



**Idalina
Alcântara Pinto
Martins**

Comportamento de materiais compósitos de reforço celular

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri / the jury

presidente / president

Robertt Angelo Fontes Valente

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias

Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

vogais / examiners committee

António Joaquim Mendes Ferreira

Professor Associado com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Rui António da Silva Moreira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Embora qualquer trabalho pressuponha um imprescindível esforço individual, alicerça-se também em actos solidários essenciais, que não podem deixar de ser realçados. A noção de que valeu a pena resulta tanto da superação dos desafios que foram surgindo, quanto do reconhecimento do papel daqueles que, de uma ou outra forma, para isso colaboraram.

Nem sempre as palavras conseguem expressar a dimensão real da intenção que transportam e tornam-se muitas vezes insuficientes. Ainda assim, alinho aqui algumas frases de reconhecimento sincero.

Dirijo, em primeiro lugar, o meu agradecimento ao Professor Doutor Filipe Teixeira-Dias, professor e orientador, pela disponibilidade e exigência de rigor, bem como pelas sugestões, sem os quais este trabalho teria sido privado de importantes espaços de análise. Agradeço, de igual modo, a sua amizade e incentivo.

Dedico um agradecimento muito especial à minha avó, que sempre acompanhou com dedicação o meu percurso e que contribuiu enormemente para o meu crescimento; e à minha mãe, amiga e orientadora nesta estrada da vida, que me apoiou na necessária superação pessoal e dedicou longas horas à revisão textual deste trabalho. Obrigada a ambas pelo carinho e pela dedicação incondicionais.

Aos colegas do GRIDS agradeço a ajuda prestada. Fui aprendendo a conhecê-los, nem sempre investindo tanto quanto gostaria, e espero poder continuar a aprofundar o nosso companheirismo.

Aos meus amigos agradeço o companheirismo, bem como as palavras de inspiração e apaziguamento.

palavras-chave

materiais compósitos, materiais celulares, cortiça, absorção de energia, simulação numérica, método dos elementos finitos.

resumo

Com este trabalho pretende-se desenvolver e estudar as características, as propriedades e o comportamento de um novo material compósito, resultante da associação da cortiça na forma granulada a uma resina epóxida, ao qual foi dado o nome de Core-Y. O trabalho centra-se no estudo experimental e numérico do material compósito referido. A dissertação compreende três vertentes principais. A primeira apresenta um processo de fabrico optimizado do Core-Y. A segunda desenvolve um estudo experimental do material com base em dois ensaios, nomeadamente de compressão axial *quasi*-estática sobre provetes cilíndricos de Core-Y e de vibração livre sobre provetes prismáticos de Core-Y. Apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios experimentais realizados e determinam-se as propriedades mecânicas essenciais. A terceira vertente apresenta um estudo de modelação constitutiva e de modelação numérica, com base nos resultados experimentais. O principal objectivo deste estudo numérico é analisar a capacidade de absorção de energia de estruturas tubulares metálicas incorporando Core-Y, com vista a estudar novas aplicações para este material compósito. Desenvolve-se, implementa-se e valida-se um modelo numérico para simular as estruturas tubulares ensaiadas experimentalmente, utilizando o programa de elementos finitos Abaqus/Explicit com recurso ao método de *mass scaling*.

keywords

composite materials, cellular materials, cork, energy absorption, numerical simulation, finite elements method.

abstract

This work aims to develop and study the characteristics, properties and behavior of a new composite material, resulting from the combination of cork in a granular form and an epoxy resin, which was called Core-Y. The work focuses on an experimental and numerical study of the referred composite material. The dissertation comprises three main parts. The first presents an optimized manufacturing process of Core-Y. The second develops an experimental study of the material based on two tests, namely *quasi*-static axial compression on cylindrical samples of Core-Y and free vibration of prismatic specimens of Core-Y. The results of experimental tests are presented and analysed and the main mechanical properties are determined. The third part presents a study of constitutive and numerical modelling, based on the experimental results. The main purpose of this numerical study is to analyse the energy absorption capacity of metallic tubular structures incorporating Core-Y, aiming to study new applications for this composite material. A numerical model to simulate the tubular structures tested experimentally is developed, implemented and validated, using the finite element analysis software Abaqus/Explicit associated to the method of *mass scaling*.

Conteúdo

I	ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS	3
1	A cortiça: um material celular natural	4
1.1	Formação e produção da cortiça	4
1.2	Estrutura da cortiça	6
2	Estado da arte	8
2.1	Comportamento mecânico da cortiça	8
2.2	Materiais com base em cortiça	10
2.2.1	Estruturas sanduíche com base em cortiça	11
2.2.2	Materiais compósitos de cortiça	11
2.3	Conclusões	14
3	Objectivos e guia de leitura	15
II	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL	17
4	Introdução	18
5	Processo de fabrico do Core-Y	20
5.1	A matriz do Core-Y	20
5.1.1	A resina epóxida	21
5.2	Processo de Fabrico do Core-Y	22
5.2.1	Material e ferramentas	22
5.2.2	Primeiras abordagens ao processo de fabrico	23
5.2.3	Processo de fabrico optimizado	25
5.2.4	Discussão e análise comparativa dos processos de fabrico	28
6	Ensaio de compressão axial <i>quasi</i>-estática	29
6.1	Metodologia do ensaio	29
6.2	Observações visuais	30
6.3	Resultados e discussão dos ensaios de compressão axial	32
6.4	Curva de comportamento médio	41
6.5	Conclusões	42

7	Ensaio de vibração livre	44
7.1	Introdução	44
7.2	Metodologia de ensaio	45
7.3	Tratamento de resultados	46
7.3.1	Procedimento em MATLAB	46
7.3.2	Aplicação da teoria de vibração de flexão de vigas	47
7.4	Resultados e discussão	49
7.5	Conclusões	51
III	MODELAÇÃO CONSTITUTIVA E NUMÉRICA	53
8	Modelação constitutiva	54
8.1	Modelos constitutivos propostos	54
8.2	Validação numérica dos modelos constitutivos	58
8.3	Resultados e discussão do estudo de validação numérica dos modelos constitutivos	61
9	Análise <i>quasi</i>-estática	64
10	Procedimento e métodos	65
10.1	Configuração dos ensaios numéricos	65
10.2	Parâmetros do modelo	66
10.2.1	Geometria das estruturas e tipo de elementos	66
10.2.2	Modelos de material	68
10.2.3	Definição de contactos e condições de fronteira	68
10.3	Seleccção da malha de elementos finitos	68
10.3.1	Validação numérica do modelo do tubo de Alumínio	71
10.3.2	Resultados e discussão da validação numérica do tubo de Alumínio . . .	73
11	Resultados e discussão	78
IV	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
12	Considerações finais	82

Parte I

ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

Capítulo 1

A cortiça: um material celular natural

A estrutura celular da cortiça insere-a na classe dos materiais celulares naturais, que assume cada vez maior importância em diferentes ramos da Engenharia. Como a palavra indica, trata-se de materiais em que a presença de células é predominante e em que estas são responsáveis pelas propriedades particulares que possuem [1]. A madeira, o coral e o osso são exemplos de outros materiais pertencentes a esta classe.

As propriedades da cortiça são, em muitos casos, mal conhecidas. Este facto terá limitado a expansão das suas aplicações e dificultado o desenvolvimento tecnológico do sector que lhe está associado. Com efeito, a utilização de materiais celulares naturais em aplicações industriais é ainda pouco frequente, merecendo por isso ser mais explorada.

No entanto, uma vez que a cortiça é um material reciclável e reutilizável, ecológico, higiénico, de fácil manutenção e com elevada durabilidade, poderá esperar-se que seja capaz de satisfazer exigências em várias vertentes, nomeadamente, ambientais, económicas e de desempenho.

1.1 Formação e produção da cortiça

A cortiça é um material celular natural, constituindo o revestimento exterior do tronco e dos ramos do sobreiro (*Quercus suber* L.). É extraída periodicamente, geralmente com intervalos de nove anos, sob a forma de pranchas com espessura adequada ao processo industrial a que se destina, como se pode ver na Figura 1.1. O corte e o arrancamento da cortiça são feitos manualmente com auxílio de um machado, por golpes sucessivos ao longo de linhas verticais e horizontais na casca da árvore. Este processo designa-se por descortiçamento ou desbóia.

O sobreiro é uma árvore de crescimento lento e grande longevidade, que pode atingir 250 a 350 anos de idade, embora se considere que a idade limite para a capacidade de produção de cortiça seja entre 150 e 200 anos. Uma vez removida a cortiça, a camada geradora (o *felogénio*) é destruída. No entanto, desenvolve-se uma nova camada nos tecidos interiores, o *entrecasco*, dando origem a um novo felogénio, que recomeça a produzir células de cortiça (*felogénio traumático*, visto constituir-se pelo trauma do descortiçamento). É esta capacidade de regeneração de felogénio que permite a exploração do sobreiro de uma forma sustentada ao longo da vida da árvore.

A primeira cortiça produzida pelo sobreiro, a cortiça virgem, é extraída quando a árvore atinge dimensões consideradas adequadas para o primeiro descortiçamento, normalmente entre os 20 e os 35 anos de idade, quando o diâmetro do tronco atinge 20 a 25 cm. A cortiça



Figura 1.1: Pranchas de cortiça após a sua extracção do sobreiro [2].

desta geração apresenta sulcos e fendas verticais significativas, resultantes das fracturas que ocorreram devido às fortes tensões tangenciais originadas pelo crescimento radial do tronco do sobreiro e, por este motivo, destina-se unicamente ao fabrico de aglomerados. A segunda camada de cortiça produzida pela árvore (*cortiça segundeir*), gerada pelo felogénio traumático, continua a apresentar numerosas fracturas verticais, resultantes de tensões geradas pelo crescimento radial da árvore. Existe ainda uma terceira camada (*cortiça amadia*), cuja extracção se faz ao fim de cerca de 40-50 anos de idade do sobreiro e se apresenta já como uma camada de espessura uniforme, com poucas fracturas e de pequena profundidade. Como o crescimento radial da árvore em fase adulta é menor, as tensões resultantes do engrossamento do tronco não são geralmente suficientes para provocar rotura do tecido. Esta é a cortiça que constitui matéria-prima para a indústria de rolhas [1].

A produção de sobreiro ocupa actualmente uma área total de 2,3 milhões de hectares, dos quais 54% se encontram na Península Ibérica e 37% no norte de África. Individualmente, Portugal é o maior produtor de cortiça, extraindo cerca de 190 mil toneladas por ano, num total mundial de, aproximadamente, 374 mil toneladas. Além disso, os produtos derivados da cortiça constituem uma das mais valiosas exportações nacionais. Pelo exposto, pode concluir-se que a cortiça contribui de forma relevante para a economia portuguesa. Paralelamente, as florestas de sobreiro desempenham um papel ecológico importante na luta contra a desertificação e na manutenção da biodiversidade.

O sector da cortiça engloba as principais actividades produtivas: preparadora, transformadora, de aglomeração e de granulação. A actividade transformadora é a que tem maior relevo em Portugal, detendo a maior capacidade industrial e empresarial do mundo para a

transformação da cortiça e exportação dos produtos derivados já transformados. Actualmente, o principal receptor dos produtos de cortiça é a indústria vinícola, representando cerca de 68% de toda a produção, seguido pela construção civil (15%) e pela indústria automóvel (7%) [3].

As aplicações da cortiça incluem, entre outras, rolhas, artigos de artesanato, utensílios de cozinha, solas para calçado, isolantes térmicos e acústicos, revestimentos de paredes e tectos, juntas para motores de combustão interna e queima para produção de energia (pó de cortiça) [4].

Os materiais que mais directamente competem com a cortiça em termos de aplicações de engenharia são, naturalmente, outros materiais celulares. Contudo, assiste-se actualmente a inesperadas substituições em muitas aplicações, o que significa que poderão abrir-se à cortiça novas áreas de aplicação. Tal é o caso, por exemplo, da utilização deste material como absorvedor de energia de impacto em aplicações de segurança passiva automóvel.

1.2 Estrutura da cortiça

Quando, em 1664, Robert Hooke aperfeiçoou o seu microscópio, um dos primeiros materiais que observou foi a cortiça. Esta observação levou-o à descoberta da unidade básica das plantas e dos tecidos biológicos, à qual deu a designação de *célula*, palavra derivada do latim *cella*, que significa pequeno compartimento. No seu livro *Micrographia* [5], foram publicados os desenhos feitos pelo autor, que reproduzem a estrutura da cortiça.

Desenhando as células em duas secções perpendiculares entre si, Hooke detectou a anisotropia da estrutura da cortiça, conforme se pode observar na Figura 1.2. A imagem da esquerda representa a secção de uma estrutura composta por células alongadas, dispostas em fiadas contíguas; a da direita representa uma estrutura aproximadamente isotrópica (paredes celulares orientadas igualmente em todas as direcções), composta por células aproximadamente hexagonais. Com base nestas observações, é frequente referir três direcções principais que definem a orientação da cortiça no sobreiro: a direcção radial (ao longo do raio do tronco), a direcção axial (paralela à direcção do eixo do tronco) e a direcção tangencial (tangencial à circunferência do tronco). A proposta de Hooke veio posteriormente a ser confirmada por outros autores, constituindo uma descrição simplista da estrutura real da cortiça.

De uma forma simplificada, as células de cortiça podem ser descritas como prismas, em média hexagonais, empilhados em *colunas* ou *fiadas*, cujo eixo tem a direcção radial. Uma das complexidades da estrutura da cortiça reside na irregularidade das paredes das células (geralmente onduladas) segundo esta direcção. As células de uma mesma coluna são geradas, uma após outra, pela mesma célula de felogénio e não existe correlação entre as alturas das células de cortiça em colunas adjacentes. As dimensões das células variam bastante. De um modo geral, as paredes celulares têm uma altura média de $45\ \mu\text{m}$, um lado de base hexagonal de comprimento aproximadamente igual a $20\ \mu\text{m}$ e uma espessura média de parede celular de $1\ \mu\text{m}$.

As propriedades específicas da cortiça resultam, em grande medida, da densidade relativa e da sua constituição química, que é substancialmente diferente da de outros tecidos vegetais. A fracção volúmica de fase sólida da cortiça constitui 15% do volume total do material, sendo as células da cortiça fechadas. O composto principal da parede celular é a suberina, um biopolímero de carácter lipídico responsável pela muito baixa permeabilidade da cortiça, que se encontra associado à lenhina, um biopolímero de carácter aromático.

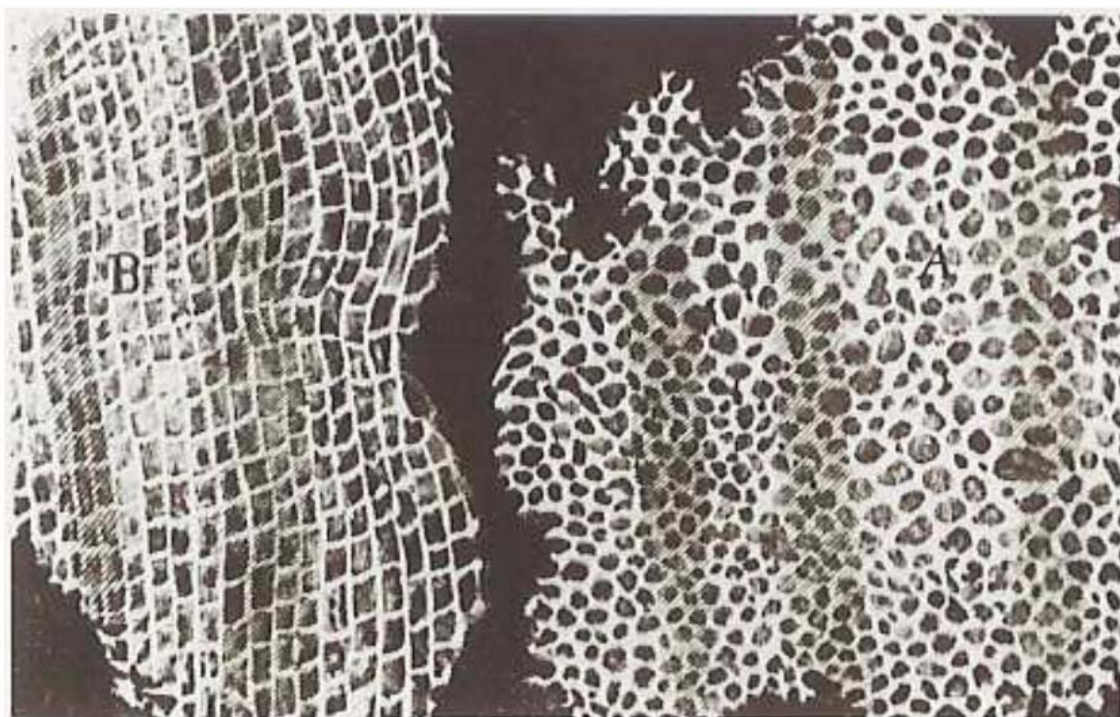


Figura 1.2: Ilustração das células de cortiça desenhadas por Robert Hooke [1].

A composição química da cortiça e a estrutura molecular dos seus componentes continuam a ser objecto de investigação, sendo muitos aspectos ainda desconhecidos. Por enquanto, as características mecânicas da cortiça são atribuídas, em grande medida, à suberina. O facto de a cortiça ser formada por células fechadas e ricas em suberina permite uma baixa condutibilidade térmica e acústica, uma elevada impermeabilidade e, em parte, elevada resiliência e capacidade de absorção de vibrações. Adicionalmente, a presença de células abertas à superfície explica o elevado coeficiente de atrito.

O facto de a cortiça ser um material celular natural e de características anisótropicas resulta numa grande variabilidade nos valores das suas propriedades, quando medidos em amostras diversas ou mesmo em amostras retiradas da mesma prancha. De facto, as próprias dimensões das células variam significativamente com a época sazonal em que se desenvolveu o seu crescimento. Outra dificuldade na caracterização da cortiça prende-se com a existência de *canais lenticulares* (pequenas regiões no felogénio onde não há produção de células de cortiça) e de defeitos como o *bofe* (descontinuidade do tecido suberoso, com porosidade elevada), o *verde* (áreas da cortiça com elevado teor de humidade rodeadas por cortiça com teor normal) ou o *enguiado da costa* (fendas pronunciadas e dirigidas axialmente, na costa das pranchas) [1, 6].

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Comportamento mecânico da cortiça

Os estudos realizados sobre a cortiça concentram-se, maioritariamente, no seu comportamento mecânico *quasi*-estático. Grande parte dos estudos foi motivada pelo tipo de carregamentos a que está sujeita uma rolha de cortiça dentro do gargalo de uma garrafa, tendo sempre em vista uma melhoria da qualidade e do desempenho deste material para a indústria rolheira. São exemplo disso os estudos sobre a viscoelasticidade, a fluência e a relaxação de tensões; as publicações sobre o coeficiente de Poisson, a influência da humidade e porosidade no material; os avanços no estudo dos mecanismos de crescimento e fractura da cortiça com o intuito de conhecer os parâmetros que afectam directamente a qualidade das pranchas de cortiça, *etc.* Os estudos sobre atrito, amortecimento de vibrações e isolamento acústico têm sido, em grande parte, motivados pelo mercado centrado no uso de painéis de aglomerado para a construção civil [6].

A estrutura da cortiça e a deformação das suas paredes celulares em ensaios de tracção e de compressão foram estudadas, em grande detalhe, por Gibson *et al.* [7]. Estes autores relacionaram valores do módulo de elasticidade e propriedades mecânicas da cortiça, segundo as suas direcções principais (radial, axial e tangencial), obtidas experimentalmente, com expressões teóricas baseadas na deformação da estrutura celular do material. Em 1997, Gibson e Ashby [8], publicaram no livro *Cellular Solids* a teoria da deformação das paredes de materiais celulares, em particular da cortiça, sob solicitações diversas.

Rosa e Fortes [9] investigaram o efeito da velocidade de deformação no comportamento da cortiça em compressão, considerando a anisotropia do material. Estes autores estudaram o comportamento da cortiça para três velocidades de deformação nas três direcções principais. Os mesmos autores estudaram ainda a recuperação de dimensões após compressão, inferindo que a taxa de recuperação diminui significativamente com o tempo e aumenta com o grau de deformação inicial. Noutra publicação, Rosa e Fortes [10] apresentaram um estudo sobre relaxação de tensões e fluência da cortiça sob compressão, também ao longo das três direcções principais. Já no âmbito da análise do comportamento de rolhas de cortiça, realizaram ensaios cíclicos de carga-relaxação-descarga em compressão, nas direcções radial e tangencial.

As propriedades viscoelásticas da cortiça foram posteriormente estudadas por Mano [11], para uma gama de temperaturas entre -40 e 120°C. No desenvolvimento deste estudo, o autor determinou os módulos de armazenamento e de perda. No seguimento deste tema, Mano realizou ensaios de fluência em provetes de cortiça sob compressão, a temperaturas entre 0 e

50 °C, e avaliou o comportamento em termos de relaxação de tensões [12].

O atrito da cortiça em contacto com outros materiais e com a própria cortiça, bem como a relação do coeficiente de atrito do material com a tensão de compressão, velocidade de deslizamento e humidade da amostra foram estudados por Vaz e Fortes [13]. Estes autores obtiveram valores de coeficiente de atrito entre 0,4 e 1,2. Marat-Mendes e Neagu [14] investigaram a relação entre as propriedades eléctricas da cortiça e o teor de humidade do material. Estes autores analisaram ainda o processo de relaxação dieléctrica.

A caracterização do comportamento mecânico da cortiça quando sujeita a solicitações variadas requer um conhecimento relativamente profundo dos mecanismos de deformação das células deste material. Estes mecanismos foram estudados por Pereira *et al.* [15] e por Pina e Fortes [16]. A influência dos mecanismos de crescimento das células de cortiça no sobreiro sobre as suas propriedades mecânicas foi estudada por Pereira *et al.* [17] e por Fortes e Rosa [18]. Estes autores observaram tensões tangenciais de tracção crescentes e tensões radiais de compressão decrescentes com o aumento da distância ao eixo do sobreiro. Analisaram ainda algumas consequências das tensões de crescimento, como as ondulações das paredes celulares, a variação de espessura dos anéis de crescimento e a existência de fendas nas camadas exteriores da cortiça.

A influência do gás presente no interior das células da cortiça sobre as propriedades mecânicas foi estudada por Fortes e Rosa [19], que afirmaram que a contribuição do gás se podia desprezar para níveis de deformação inferiores a 70%. Mais tarde, os mesmos autores averiguaram os mecanismos de fractura da cortiça e estudaram as propriedades relacionadas com a deformação e a fractura do material quando solicitado à tracção [20]. Rosa e Fortes [21] estudaram, ainda, os parâmetros que regem a absorção de água pela cortiça e os seus efeitos no comportamento mecânico do material, tendo em conta a anisotropia da cortiça. Este tema foi também abordado por Gil *et al.* [22]. Fortes e Nogueira realizaram uma análise pormenorizada dos mecanismos de deformação da cortiça e estudaram o efeito de Poisson [23].

Gil observou aglomerados puros de cortiça através de microscopia electrónica, antes e após densificação do material. O autor analisou, ainda, a relação entre a distância média das paredes celulares e a compressão aplicada, bem como a influência dos tratamentos de densificação na composição química do aglomerado [24, 25]. Teixeira *et al.* [26] estudaram a influência da molhabilidade de alguns adesivos utilizados no fabrico de cortiça aglomerada sobre o comportamento mecânico de aglomerados compostos de cortiça. O comportamento mecânico à compressão, o comportamento à flexão em três pontos e a estrutura microscópica dos aglomerados foram também estudados pelo mesmo autor. Gómez-Serrano *et al.* [27] realizaram um estudo sobre a densidade de aglomerados puros e compostos fabricados a partir de desperdícios de cortiça. Analisaram, ainda, o efeito do tamanho das partículas de cortiça e do teor de resina na densidade aparente dos aglomerados.

Nóvoa *et al.* [28] investigaram o comportamento mecânico de uma argamassa polimérica modificada com granulados de cortiça. Estes autores realizaram ensaios de compressão e de flexão até ruptura com diferentes argamassas, com teores volúmicos de cortiça entre 0 e 45%. Por fim, estudaram a influência da fracção volúmica de cortiça e a fracção mássica de resina/areia no comportamento mecânico das argamassas poliméricas modificadas com cortiça.

A variabilidade da estrutura e das propriedades da cortiça associada ao facto de este ser um material natural é um dos maiores obstáculos à sua caracterização. Por este motivo, os factores que envolvem e influenciam a variabilidade mencionada são objecto de variados estudos, de forma a averiguar formas de controlo de qualidade química e estrutural da cortiça. Neste âmbito, Costa *et al.* [29] analisaram a variabilidade do crescimento radial em sobreiros

adultos, na zona sudoeste de Portugal. Os autores sugerem que os resultados obtidos neste estudo fornecem dados úteis para a optimização do tempo de ciclo de produção de cortiça, de modo a efectuar a extracção das pranchas no momento em que se espera obter o produto com determinadas características, nomeadamente uma determinada espessura. A relação entre o crescimento do sobreiro e as características do solo, do declive e de escoamento de montados na zona sudeste de Portugal foi analisada por Costa *et al.* [30].

Em 2004 foi publicado o primeiro livro científico sobre a cortiça — A Cortiça — da autoria de Fortes *et al.* [31] e, posteriormente, a autora Helena Pereira escreveu um livro no mesmo âmbito — Cork: Biology, Production and Uses — [32]. Estes livros incluem informação sobre a formação e o crescimento da cortiça; a sua estrutura, composição química e qualidade; propriedades físicas como a densidade e resistência ao desgaste; propriedades térmicas, eléctricas, viscoelásticas e acústicas; propriedades e comportamento mecânico à compressão, tracção, fractura e torsão; entre outras.

Recentemente, alguns autores estudaram o comportamento da cortiça quando sujeita a solicitações de impacto e a utilização deste material em sistemas de absorção de energia. Gameiro *et al.* realizaram estudos experimentais e numéricos sobre o comportamento dinâmico de diferentes tipos de cortiça quando solicitada em compressão, a diferentes taxas de deformação. Adicionalmente, de forma a estudar a utilização da cortiça como material de absorção de energia de impacto em componentes estruturais, os autores testaram, para diferentes velocidades de deformação, o comportamento de tubos de alumínio de diferentes geometrias, com e sem cortiça confinada. Os resultados obtidos numericamente com o programa LS-DynaTM, através do método dos elementos finitos, mostraram estar em razoável conformidade com os resultados obtidos experimentalmente. Finalmente, os resultados obtidos com cortiça confinada, em termos de capacidade de absorção de energia, foram bastante satisfatórios e mostraram que a utilização deste material neste âmbito apresenta grande potencialidade [33]. No seguimento deste estudo, Gameiro e Cirne [34] estudaram as características de tensão-deformação, a capacidade de absorção de energia e as transições entre modos de colapso para tubos circulares com e sem cortiça confinada, fazendo variar as dimensões do diâmetro, da espessura e do comprimento do tubo. Ainda no mesmo âmbito, Gameiro *et al.* [35] realizaram simulações numéricas em LS-DynaTM de situações de impacto uniaxial a 10 e a 15 m/s em tubos de secção circular e quadrangular, com e sem cortiça confinada. Os autores concluíram que o confinamento de cortiça, em ambas as geometrias analisadas, leva a um aumento significativo da capacidade de absorção de energia da estrutura. Concluíram, ainda, que a espessura do tubo influencia quer os modos de deformação quer a absorção de energia.

De seguida, tenta-se resumir e descrever os trabalhos desenvolvidos nos últimos anos no âmbito da aplicação e desenvolvimento de materiais com base em cortiça. É de notar que muitos destes trabalhos não chegaram ainda a entrar no mercado e apresentam grande potencialidade para fins de projecto.

2.2 Materiais com base em cortiça

A incorporação de materiais celulares noutros materiais, como por exemplo nos materiais compósitos ou nas estruturas sanduíche, tem sido objecto de estudo nas últimas décadas, tendo-se revelado bastante benéfica, por exemplo, na melhoria da capacidade de absorção de energia das estruturas em que são incorporados. No entanto, a utilização de materiais celulares naturais, como é o caso da cortiça, está pouco explorada e é ainda pouco frequente,

merecendo, por esse motivo, ser investigada e explorada.

De seguida, tenta-se resumir e descrever os trabalhos desenvolvidos nos últimos anos no âmbito da aplicação e desenvolvimento de materiais com base em cortiça. Embora não estejam directamente ligados ao material estudado neste trabalho, esses estudos demonstram a versatilidade e as inúmeras possibilidades de aplicação da cortiça.

Salienta-se que a incorporação de cortiça em materiais compósitos se encontra pouco estudada, o que limita, naturalmente, a existência de bibliografia específica sobre o tema. Esta foi uma dificuldade com que foi necessário lidar, mas que se traduziu também num desafio.

2.2.1 Estruturas sanduíche com base em cortiça

Castro *et al.* [36] referem que os aglomerados com base em cortiça são ideais enquanto componentes principais de estruturas sanduíche leves, como as usadas em aplicações aeroespaciais. Ensaio de flexão estática e de compressão dinâmica revelam que o desempenho de aglomerados de cortiça depende essencialmente do tamanho do seu granulado, da sua densidade e do processo de colagem. Os aglomerados otimizados de cortiça têm determinadas propriedades que confirmam a sua boa capacidade como material interior das estruturas tipo sanduíche, quando comparado com outros materiais convencionais. As propriedades de interesse primordial para o interior dessas estruturas são a baixa densidade, o módulo de corte, a resistência ao corte elevado, a elevada rigidez na direcção perpendicular às faces e boas características de isolamento acústico e térmico [37]. Algumas propriedades dos aglomerados de cortiça sugerem que estes materiais podem evidenciar propriedades notáveis quando utilizados como núcleo de uma estrutura sanduíche, nomeadamente elevada tolerância a danos de cargas de impacto, bom isolamento acústico e térmico e boas características de amortecimento de vibrações. No estudo de Castro *et al.* foram testados vários tipos de aglomerados de cortiça comerciais (com diferentes granulometrias), evidenciando um fraco desempenho mecânico nuclear comparativamente a materiais convencionais.

A fim de melhorar o comportamento mecânico da cortiça, foram fabricados três novos tipos de aglomerado de cortiça [36] com granulados convencionais, mas utilizando resina epóxida como elemento de adesão. Esses aglomerados apresentam valores limites de tensão de corte para o material nuclear bastante razoáveis, o que reduz a região de propagação de fendas. Todas as estruturas sanduíches produzidas à base de cortiça apresentaram valores de carga consideravelmente maiores do que os obtidos para outro tipo de material de elevado desempenho. Verifica-se também uma boa capacidade de recuperação, característica muito própria da cortiça. Comparativamente a espumas de alto desempenho, os componentes de sanduíche com aglomerados de cortiça têm uma capacidade de absorção de energia mais elevada e, portanto, melhor resistência à colisão em situações de impacto.

2.2.2 Materiais compósitos de cortiça

Os parágrafos que se seguem dizem respeito a trabalhos desenvolvidos por Gilet *et al.* Estes autores desenvolveram um processo patenteado para a produção de aglomerados compósitos provenientes da fragmentação e/ou trituração de resíduos, nomeadamente, de embalagens compostas por camadas de plástico/cartão/chapas de alumínio (pacotes de bebidas) e de partículas de cortiça, sem adição de ligantes externos, por meio de prensagem e aquecimento durante um período de tempo suficiente para realizar aglomeração e resistência mecânica. Este processo,

que também pode ser usado com resíduos industriais, dá origem a compósitos com características muito diferentes para várias aplicações tais como, por exemplo, maior percentagem de cortiça para aplicações de isolamento e maior percentagem de material de embalagem cartonada, obtendo-se maior rigidez e resistência mecânica. Os novos materiais compósitos têm um comportamento mecânico que permite antever utilizações em revestimento de pisos, painéis divisores, mobiliário e outras aplicações semelhantes. Estão também previstas novos estudos sobre esses compostos, nomeadamente para aplicações em materiais anti-eletrostáticos (por exemplo, revestimentos de pavimentos de salas de informática). O novo composto demonstrou ter menor condutividade do que o aglomerado comercial, o que o torna um material melhor para o armazenamento de carga [38–43].

Aglomerados de cortiça e polímeros termoplásticos

Gil *et al.* realizaram também um trabalho em que se desenvolveu um aglomerado de partículas de cortiça com aglutinadores termoplásticos, principalmente para aproveitamento do pó de cortiça, um dos principais desperdícios industriais da cortiça. Os testes foram realizados usando polietileno (PE) e polipropileno (PP) em pó, com diferentes fracções volúmicas. Foram escolhidos termoplásticos de baixo índice de fusão devido às suas vantagens relativamente a colas convencionais, ou seja, a ausência de solventes e baixa toxicidade. No caso de alguns termoplásticos, como o polietileno, a colagem de superfícies é possível numa única operação. Estes compostos são rígidos e duros, apesar de não serem resilientes, ao contrário de aglomerados de cortiça comuns, podendo ser utilizados no fabrico de painéis com múltiplas aplicações [24, 25, 40, 41, 44, 45].

Outro estudo de combinação da cortiça com PP foi realizado por Abdallah *et al.* [46]. A modificação da superfície da cortiça é feita com o objectivo de melhorar a aderência da matriz da cortiça, com base num tratamento com água quente, à temperatura ambiente. Verificou-se que a densidade diminui em função do tempo de tratamento de água. Ensaio de tracção da matriz de PP reforçada com cortiça tratada revelaram a importância dessa modificação na superfície.

Argamassa de baixo peso à base de granulos de cortiça

Aziset *al.* [47] desenvolveram um betão com incorporação de cortiça em três relações cimento-agregados, estudando a influência da razão água-cimento, do processo de cura e do processo de vibração na resistência à compressão, tracção e flexão, na permeabilidade e na condutividade térmica do material compósito. Estes autores consideram que os valores obtidos para a resistência à tracção e à compressão são elevados, quando comparados com betões leves produzidos com agregados orgânicos como, por exemplo, a casca de arroz, as fibras de coco ou as lascas de madeira. Neste sentido, Aziz *et al.* [47] consideram o betão leve de cortiça um material muito promissor para aplicações especiais e variadas [Aziz-lightweight concrete using cork granules]. Existem outros estudos de caracterização experimental do betão com diferentes granulometrias de cortiça. Zbigniew *et al.* [48] testaram provetes com várias percentagens de cortiça, mantendo constante a relação água/cimento. Branco *et al.* [49] testaram diferentes composições de betão utilizando agregados de cortiça natural e expandida. Também realizaram ensaios de compressão para diferentes idades do betão. Os resultados apresentados confirmaram que o betão perde resistência com o aumento da fracção volúmica de cortiça incorporada e que a utilização de cortiça expandida leva a perdas mais significativas. Karade *et*

al. [50] concluíram que o granulado de cortiça e o cimento são compatíveis, que a compatibilidade diminui com o aumento da percentagem de cortiça e que granulometrias mais grosseiras (entre 1 e 3 mm) apresentam maior compatibilidade com o cimento.

Relativamente a outros betões leves com incorporação de cortiça, é ainda possível encontrar referências aos estudos de caracterização mecânica de uma argamassa polimérica leve com incorporação de granulado de cortiça desenvolvidos por Nóvoa *et al.* [28]. Essa argamassa possui como principal vantagem o aumento da ductilidade em compressão. Existem também estudos referentes ao desenvolvimento de materiais compósitos de granulado de cortiça, pasta de celulose e fibras de cânhamo, por Eires *et al.* [51]; de cimento, granulado de cortiça, resina de eucalipto e pinho, por Pereira *et al.* [52, 53]; e de gesso e cortiça, por Olivares *et al.* [54].

Silva [55] estudou a melhoria da resposta sísmica de edifícios com recurso a paredes de um material compósito de matriz de argamassa e elementos dispersos de cortiça, constatando que as argamassas têm uma tendência evidente para a diminuição da tensão de rotura com a adição de cortiça e para a diminuição do módulo de elasticidade inicial e da densidade da argamassa com o aumento da percentagem de cortiça. Os resultados permitiram verificar tendências e confirmar as vantagens de utilização desse material em elementos estruturais dissipadores de energia.

Materiais compósitos à base de gesso e cortiça

Hernández-Olivares [54] mostra que existe uma boa interacção entre a matriz de gesso e o granulado de cortiça e que vários materiais podem ser desenvolvidos através da mistura desses materiais em diferentes fracções volúmicas. Este material compósito não é um material absorvente de som, em contrapartida, as suas propriedades de isolamento térmico são muito boas. Este material é adequado a aplicações de construção tais como, por exemplo, divisórias. No entanto, necessita de outros agentes de reforço para melhorar as suas propriedades mecânicas.

Material elastómero de poliuretano com enchimento de cortiça

Oprea [56] estudou o efeito da cortiça como material de enchimento em estruturas de suporte à base de resina de poliuretano para isolamento passivo. Foram examinadas as propriedades mecânicas e térmicas em materiais compósitos que tinham entre 1 e 15% de cortiça. Oprea concluiu que as propriedades mecânicas dos materiais compósitos dependem principalmente da quantidade de enchimento e que a adição de cortiça nos compósitos de poliuretano produz um aumento do módulo de Young e uma diminuição no alongamento de ruptura. Este novo material compósito de poliuretano e cortiça, apresentando melhores propriedades de amortecimento, pode ser utilizado, por exemplo, em isolamento acústico e de vibração para transporte ferroviário/linhas de metro.

Aplicações na indústria automóvel

Paulino [2] explorou a capacidade da cortiça actuar como material de absorção de energia de impacto, no âmbito da segurança passiva automóvel. Estudou numericamente os benefícios da implementação de *paddings* de cortiça micro-aglomerada no interior das portas laterais dos veículos, através de simulação numérica de colisões laterais, recorrendo ao programa de simulação numérica pelo método dos elementos finitos LS-DynaTM. Esta autora confrontou os benefícios da cortiça com os de outros materiais celulares tais como, por exemplo, a espuma de poliuretano, o IMPAXXTM e a espuma de Alumínio. Paulino verificou que a espuma de

alumínio é o material com maior capacidade de absorção de energia, logo seguido pela cortiça. Já em termos de energia absorvida específica, o IMPAXXTM foi o que melhores resultados apresentou, seguido pela cortiça microaglomerada. A cortiça apresenta os melhores valores de pico de aceleração para valores elevados de energia inicial de impacto. Paulino confrontou ainda os resultados obtidos com e sem confinamento de um *padding* de cortiça no interior da porta ao nível da zona pélvica, observando uma significativa melhoria em termos de pico de aceleração (da ordem dos 89%) quando é implementado o *padding*. No que respeita à energia absorvida pela estrutura do automóvel, a diferença entre os resultados não é tão significativa, verificando-se, no entanto, um aumento de cerca de 9% da capacidade de absorção de energia pela estrutura com cortiça confinada.

2.3 Conclusões

A revisão bibliográfica apresentada refere estudos diversos, em campos tão distintos como os do comportamento mecânico da cortiça, da melhoria da qualidade e do desempenho da cortiça incorporada em outros materiais e do atrito, ou do amortecimento de vibrações e isolamento acústico, entre outros. O estudo, caracterização e desenvolvimentno de novos materiais derivados de cortiça apresenta-se como um campo promissor no desenvolvimento tecnológico desse material e possibilita prever o aparecimento de novos materiais compósitos e de novas aplicações, principalmente devido às características específicas dos materiais à base de cortiça.

Capítulo 3

Objectivos e guia de leitura

O objectivo principal do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação consiste em estudar e desenvolver um material compósito inovador, resultante da associação da cortiça na forma granulada a uma resina epóxida. Trata-se de um material compósito de matriz polimérica — a resina epóxida — e reforço celular natural — a cortiça. Optou-se por designar este material pela sigla Core-Y, designação esta que resulta da combinação dos nomes dos seus dois elementos: a CORtiça e a resina EpoxY. Pretende-se, deste modo, contribuir para o alargamento do leque de aplicações da cortiça, estudando a viabilidade e eficiência da sua incorporação em sistemas de absorção de energia de impacto. Assim, de uma forma genérica, os objectivos do trabalho aqui proposto são os seguintes:

- Desenvolvimento de um processo de fabrico optimizado para o Core-Y.
- Realização de um conjunto alargado de ensaios experimentais que permitam caracterizar o comportamento mecânico do Core-Y e determinar as suas propriedades mecânicas essenciais.
- Desenvolvimento, discussão, implementação e validação, com base nos resultados dos ensaios experimentais e na respectiva modelação constitutiva, de um modelo numérico de comportamento para o Core-Y.
- Realização de estudos numéricos do efeito do confinamento do Core-Y na capacidade de absorção de energia de tubos de alumínio impactados axialmente.
- Desenvolvimento, discussão, implementação e validação, com base nos ensaios experimentais, de um modelo numérico para as estruturas tubulares.

Esta dissertação é composta por quatro partes principais. Abaixo são descritos resumidamente os conteúdos de cada parte, de forma a fornecer ao leitor um guia de leitura prático.

Parte 1 — Enquadramento e objectivos Nesta primeira parte é feita uma introdução à cortiça como potencial material de engenharia. Uma vez que a cortiça é o material no qual se centra o trabalho apresentado nesta dissertação, apresenta-se também uma síntese bibliográfica de trabalhos de investigação realizados sobre o seu comportamento mecânico e sobre a sua aplicação na concepção de novos materiais. Expõem-se ainda os objectivos do estudo realizado e apresenta-se um guia de leitura de todo o texto.

Parte 2 — Caracterização Experimental Na Parte 2 desta dissertação descreve-se a metodologia de produção do Core-Y, apresentando os diferentes processos adoptados e contratempos que surgiram ao longo do trabalho. Faz-se uma discussão e análise comparativa dos diferentes processos de fabrico adoptados, bem como a descrição da constituição do material em estudo e das suas propriedades.

Nesta parte é também feita a caracterização mecânica do comportamento do Core-Y através da realização de ensaios experimentais de compressão axial *quasi*-estática e de vibração livre. Descreve-se a metodologia dos ensaios e discutem-se os resultados.

Parte 3 — Modelação constitutiva e numérica Nesta parte, propõe-se um modelo constitutivo do comportamento do Core-Y em compressão axial *quasi*-estática. Realizam-se estudos numéricos sobre estruturas tubulares de alumínio com e sem preenchimento de Core-Y, recorrendo ao programa de simulação numérica Abaqus/Explicit. Realiza-se também um estudo de validação dos modelos do tubo de alumínio e de Core-Y.

Parte 4 — Considerações finais Na parte final, apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado, com referência à aplicabilidade e viabilidade do material desenvolvido. Para terminar indicam-se algumas perspectivas de desenvolvimento de trabalho futuro.

Parte II

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Capítulo 4

Introdução

Com este trabalho pretende-se desenvolver e estudar as características, as propriedades e o comportamento de um novo material compósito. Este material consiste na associação da cortiça na forma granulada a uma resina epóxida. Trata-se assim de um material compósito de matriz polimérica — a resina epóxida — e reforço celular natural — a cortiça.

Como foi referido, o material compósito designa-se Core-Y, designação esta que resulta da combinação dos nomes dos seus dois elementos: a CORtiça e a resina EpoxY. A analogia com a palavra inglesa *core* (núcleo) é propositada uma vez que está associada ao facto de o “núcleo” do material ser a cortiça. Ainda neste âmbito, refira-se que este material poder ser utilizado como núcleo de sistemas estruturais em camadas (sistemas *sandwich*).

A incorporação de materiais celulares noutros materiais tais como, por exemplo, os materiais compósitos ou as estruturas *sandwich*, tem sido objecto de estudo nas últimas décadas, tendo-se revelado bastante benéfica na melhoria da capacidade de absorção de energia das estruturas em que são incorporados. No entanto, a utilização de materiais celulares naturais, como é o caso da cortiça, está pouco explorada e é ainda pouco frequente, merecendo, por esse motivo, ser investigada e explorada.

Uma vez que a incorporação de cortiça em materiais compósitos é uma área pouco estudada, limita, naturalmente, a existência de bibliografia específica sobre o tema. Esta foi uma dificuldade com que foi necessário lidar durante a realização deste trabalho. Porém, este facto traduziu-se também num desafio.

De uma forma genérica e abrangente, um material compósito pode ser definido como a combinação de dois ou mais materiais distintos, em que um funciona como matriz e outro (ou outros) como reforço [57]. Como foi referido, no caso particular do Core-y, trata-se de um material compósito de matriz polimérica e reforço celular natural natural.

A utilização da cortiça como material de reforço deve-se, principalmente, ao facto de esta possuir um comportamento viscoelástico e, consequentemente, uma grande capacidade de absorção de energia. Por outro lado, em termos genéricos, a função do material da matriz é aglomerar o reforço e dar forma estável ao material compósito, protegendo o reforço de danos e da deterioração (nos casos em que esta possa ocorrer), e conferir propriedades específicas ao material compósito tais como, por exemplo, tenacidade, resistência química, *etc.*

Actualmente, as matrizes poliméricas são as mais usadas no fabrico de materiais compósitos. Tal se deve às suas propriedades genéricas tais como, por exemplo, a baixa densidade, a facilidade de processamento sem dano do material de reforço, a resistência química, a resistência à corrosão, a tenacidade e a ductilidade, aproveitando as propriedades mecânicas do

material de reforço.

No entanto, os materiais compósitos de matriz polimérica acarretam também algumas desvantagens que nem sempre são facilmente contornáveis. Entre estas destacam-se, por exemplo, o elevado custo dos materiais, a competitividade dos processos de fabrico, a sensibilidade ao impacto e aos factores ambientais (*e.g.* temperatura, humidade, radiação ultravioleta, *etc.*), a fluência e a relaxação [57].

Com o intuito de estudar e caracterizar o comportamento mecânico do compósito em estudo, evidenciando as potencialidades do Core-Y como material de absorção de energia, descrevem-se dois ensaios experimentais. Para levar a cabo tal caracterização foram realizados ensaios de compressão axial *quasi*-estáticos (em provetes cilíndricos) e de vibração livre (em provetes prismáticos).

Durante a fase de sistematização do processo de fabrico obtiveram-se vários lotes de material, como foi referido no capítulo relativo à descrição do processo de fabrico. Cada produto resultante de uma abordagem ao processo de fabrico possui características diferentes (fracção volúmica de cortiça, distribuição dos grânulos de cortiça, vestígios de ar e porosidade, fissuras, *etc.*), que o distinguem de qualquer outro e poderão conduzir a diferentes propriedades mecânicas.

Para levar a cabo os ensaios experimentais, foi seleccionado o penúltimo lote de experiências por ter sido o que apresentou maior homogeneidade, além do mais, foi também o que resultou numa maior quantidade de material. O lote seleccionado foi sujeito aos ensaios já referidos: ensaios de compressão axial e de vibração livre. Estudaram-se propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensões e deformações de patamar. Com base na caracterização experimental desenvolveu-se um conjunto de modelos constitutivos para o Core-Y.

Capítulo 5

Processo de fabrico do Core-Y

5.1 A matriz do Core-Y

As matrizes poliméricas podem classificar-se em dois grandes grupos: (i) o grupo dos polímeros termoplásticos e (ii) o grupo dos polímeros termoendurecíveis.

Os primeiros — polímeros termoplásticos — são formados a partir de macromoléculas de forma linear que não apresentam qualquer reticulação entre si. As posições destas moléculas são definidas através de ligações secundárias, nomeadamente através de forças de van der Waals e ligações de hidrogénio. Quando sujeitos à acção do calor, essas ligações podem ser temporariamente quebradas, dando lugar à mobilidade molecular e, consequentemente, a uma eventual reconformação.

Realizando um arrefecimento posterior produz uma espécie de “congelamento” das moléculas nas suas novas posições, restabelecendo-se as ligações químicas referidas. Por comparação com os polímeros termoendurecíveis, os termoplásticos apresentam maior resistência ao impacto, maior tenacidade e menor higroscopicidade. Estes materiais podem ainda ser facilmente processados recorrendo a técnicas de injeção ou de termoformação e podem ser reciclados. No entanto, existe maior dificuldade em impregnar completamente os reforços utilizando matrizes de natureza termoplástica [57, 58].

O segundo grupo de materiais — os polímeros termoendurecíveis — diz respeito a materiais constituídos por moléculas de estrutura tridimensional bastante rígida. Ao contrário dos polímeros termoplásticos, estes não podem ser reprocessados e adquirem forma permanente quando aquecidos. Estes polímeros adquirem-se frequentemente sob a forma de dois ou três componentes separados: uma resina, um acelerador e um catalisador. Estes componentes, quando misturados na proporção e modo adequados, dão lugar à polimerização e à constituição da estrutura tridimensional. Esta fase designa-se por “processo de cura” do material. Apesar de, em alguns casos, a cura se efectuar à temperatura ambiente, algumas resinas podem necessitar de calor e pressão adicionais. De uma forma geral, a realização de tratamentos de pós-cura a altas temperaturas, conduz a um melhoramento das propriedades mecânicas das resinas [57, 58].

No fabrico de materiais compósitos para aplicações não-estruturais e semi-estruturais, as resinas termoendurecíveis mais utilizadas são os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas. Em contrapartida, nos materiais compósitos de alta resistência utilizam-se sobretudo as resinas epóxicas, as bismaleimidas e as poliimidas. Existem, porém, aspectos que condicionam a processabilidade de alguns polímeros termoendurecíveis, tais como, por

exemplo, a libertação de voláteis durante a fase de cura, que pode originar o aparecimento de fissuras e/ou de porosidade interna [57, 58].

O material escolhido para matriz do Core-Y foi a resina Biresin[®] LS. Esta escolha prendeu-se com o facto de ser uma resina epóxida com excelentes propriedades de resistência ao impacto e um custo razoável. Na secção seguinte descrevem-se algumas das características e propriedades deste material. Adicionalmente, na Tabela 6.1 apresentam-se as propriedades da resina Biresin[®] LS.

Tabela 5.1: Propriedades da resina epóxida Biresin[®] LS, utilizada no fabrico do material compósito Core-Y [59].

Densidade	ISO 1183	g/cm ³	1, 2	
Condições de cura		Tempo Temperatura	14 d RT	2 h 80°C
Dureza de Shore	ISO 868	—	D 83	D 83
Módulo de Young	ISO 178	MPa	2420	2630
Tensão de rotura à flexão	ISO 178	MPa	95	107
Tensão de rotura à compressão	ISO 604	MPa	104	106
Tensão de rotura à tracção	ISO 527	MPa	69	74
Resistência ao impacto	ISO 179	kJ/m ²	10	14
Temperatura de transição vítrea	ISO 75B	°C	51	70

5.1.1 A resina epóxida

Como foi referido anteriormente, as resinas epóxidas podem ser classificadas como materiais poliméricos termoendurecíveis, tendo na sua base uma rede tridimensional de macromoléculas com ligações químicas fortes. Estas resinas são especialmente utilizadas no fabrico de materiais compósitos avançados e de alta resistência. Apresentam grande variedade de formulações químicas, a maior parte baseadas no diglicidil-éter de bisfenol A.

As resinas epóxidas custam cerca de quatro vezes mais que as resinas de poliéster e cerca de duas vezes mais que as resinas de vinilester. No entanto, têm como vantagens a resistência mecânica muito elevada, a resistência à abrasão, a resistência química, a boa capacidade de adesão às fibras de reforço, o facto de o respectivo processo de cura não implicar a libertação de voláteis, a grande estabilidade dimensional como consequência do seu baixo coeficiente de expansão (2 a 3%), a baixa absorção de água e o facto de as temperaturas máximas de funcionamento poderem atingir 100 a 220°C.

Embora inferior às das resinas de poliéster, devido à maior viscosidade inicial e aos tempos de cura mais longos, a processabilidade das resinas epóxidas situa-se, ainda assim, dentro de parâmetros desejáveis. As resinas epóxidas apresentam a desvantagem de possuírem formulações de base frágeis, sendo, no entanto, possível contornar esta desvantagem através da mistura com aditivos de alta tenacidade tais como, por exemplo, os termoplásticos como o ABS e borrachas CTBN [57].

5.2 Processo de Fabrico do Core-Y

Até se atingir um processo de fabrico para o Core-Y com o qual se obtivesse um material com as características desejadas (homogeneidade, distribuição do reforço, porosidade, *etc.*), foram realizadas cinco abordagens distintas ao longo de um período de mais de quatro meses. Com algumas das abordagens foi possível produzir materiais com características e propriedades aceitáveis. Porém, outras revelaram-se pouco adequadas, não se conseguindo a homogeneidade nem a distribuição de reforço pretendidas. De umas tentativas para as outras melhoraram-se e corrigiram-se aspectos negativos, num processo de optimização contínuo, até se chegar a um procedimento que se considerou optimizado e com o qual se produziu um material com as características esperadas. A Figura 5.1 apresenta um esquema genérico simplificado do processo de fabrico do Core-Y, desde a introdução da matéria prima até à maquinação do produto final. Na Figura 5.2 mostram-se imagens resultantes das diversas tentativas de fabrico do Core-Y.

A apresentação do processo de fabrico do Core-Y pode ser dividida em quatro partes, que serão descritas com algum detalhe nas secções seguintes. Numa primeira fase, faz-se a apresentação do material e das ferramentas necessárias, comuns a todas as fases, desde a experimentação à fase final. Na segunda e terceira partes, apresenta-se um resumo da fase de experimentação e do processo optimizado, respectivamente. Na última fase, realiza-se uma análise comparativa das várias abordagens utilizadas e de todas as fases do processo de fabrico do Core-Y.

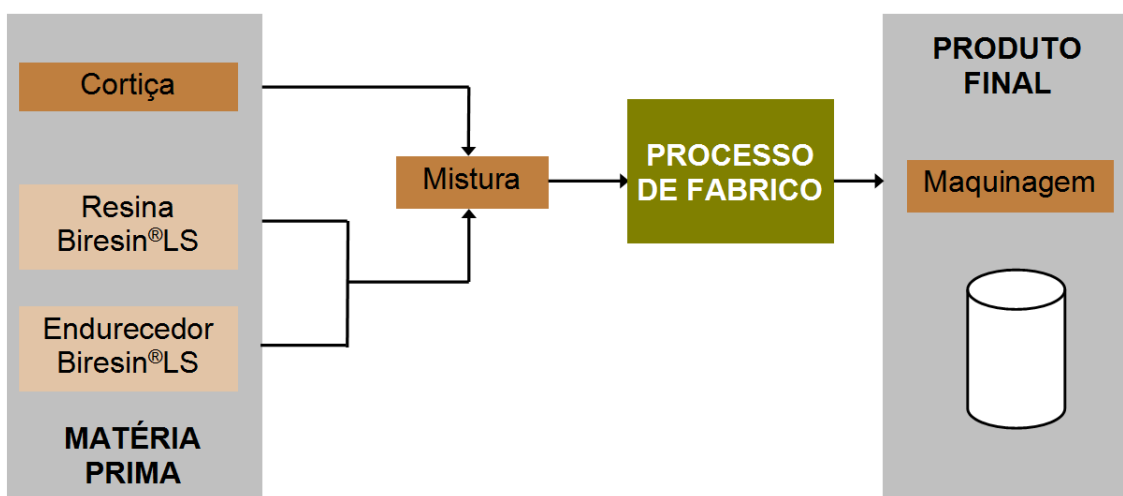


Figura 5.1: Esquema genérico simplificado do processo de fabrico do Core-Y, desde a introdução da matéria prima até à maquinação do produto final.

5.2.1 Material e ferramentas

Para produzir o Core-Y é necessário cortiça com a granulometria desejada que, para o caso, se encontra na gama de dimensões 4–7 mm. A cortiça granulada vai funcionar como elemento de reforço do material compósito. É necessário ainda a resina epóxida que, para o caso concreto, foi a resina Biresin® LS. As propriedades mecânicas desta resina epóxida, que tem o papel de matriz do material compósito, encontram-se listadas na Tabela 6.1.

As ferramentas de trabalho utilizadas são: um medidor de plástico, um recipiente de plástico fundo, uma colher para a mistura da resina com o endurecedor e um molde de plástico que servirá também de vaso de mistura durante todo o processo.

5.2.2 Primeiras abordagens ao processo de fabrico

Antes da preparação do material é necessário que o molde esteja construído. Na elaboração do material, o primeiro passo consiste na preparação de uma pequena quantidade de resina: a quantidade mínima necessária para envolver os grãos de cortiça. A resina é preparada misturando lentamente o respectivo endurecedor na proporção 1:12.

No molde coloca-se a quantidade desejada de cortiça granulada e sobre esta é vertida lentamente a resina. A resina e a cortiça são então bem misturadas com auxílio, por exemplo, de uma espátula. O objectivo desta primeira etapa é impermeabilizar os grãos de cortiça com uma fina camada de resina, tentando-se deste modo diminuir da formação de bolhas de ar durante a fase final de produção do material compósito. É de notar que, sendo o objectivo unicamente envolver os grãos de cortiça com uma película de resina, a quantidade de resina misturada deverá ser mínima, por forma a evitar o depósito de resina no fundo do molde, durante esta fase.

Posteriormente, a cortiça já envolvida pela resina é compactada e colocada numa estufa, à temperatura de 80°C durante um tempo não-inferior a duas horas. Quer a fase de aquecimento quer a fase de arrefecimento do material deverão ser feitas lentamente (velocidade de aquecimento/arrefecimento inferior a 1°C/min), ainda dentro da estufa, de forma a evitar a formação de fissuras na resina por choque térmico.

Uma vez terminada a cura, o molde pode ser retirado da estufa e preparada uma nova quantidade de resina. Pretende-se, nesta segunda etapa que toda a cortiça fique submersa em resina tentando, mais uma vez, evitar que esta se deposite no fundo do molde (sob o bloco de cortiça impermeabilizada) devido ao efeito da diferença de densidades dos dois materiais. Se necessário, deve pressionar-se a cortiça para o fundo do molde utilizando, por exemplo, uma espátula.

Na fase seguinte, o material é levado, durante um tempo não inferior a duas horas, a uma câmara de vácuo de forma a retirar as bolhas de ar que inevitavelmente se formaram no processo de submersão do bloco de cortiça com resina. Durante este processo, deve evitar-se que a agitação das bolhas de ar inicie o processo irreversível de cura, controlando a pressão da câmara de vácuo sempre que seja necessário.

Depois de deixar de ser visível a saída de bolhas de ar, leva-se o material de novo à estufa, nas mesmas condições que da primeira vez: temperatura de 80°C durante um tempo não-inferior a duas horas. Mais uma vez, quer a fase de aquecimento quer a fase de arrefecimento do material deverão ser feitas a uma velocidade de aquecimento/arrefecimento inferior a 1°C/min. Desta forma deve evitar-se a formação de fissuras por choque térmico. Uma vez terminado o processo de cura e arrefecimento procede-se à desmoldação do Core-Y.

Na Tabela 5.2 apresenta-se a esquematização do processo inicial de fabrico. Os provetes obtidos com esta abordagem podem ser observados na Figura 5.2. Como se pode facilmente observar, qualquer uma das amostras representadas na Figura 5.2 apresenta problemas resultantes do processo produtivo. De entre estes referem-se, a título de exemplo, a pouca homogeneidade na distribuição da cortiça no seio da matriz (Figuras 5.2a e b) e a existência de níveis elevados de porosidade (Figuras 5.2c e d).

Tabela 5.2: Sequências de trabalho da primeira abordagem ao processo de fabrico.

Etapa	Fase	Descrição	Tempo (minutos)
Etapa 1	1	Preparação	15
	2	Impermeabilização	15
	3	Cura	120
	4	Arrefecimento	60
Etapa 2	1	Preparação	20
	2	Enchimento	10
	3	Câmara de vácuo	120
	4	Cura	120
	5	Arrefecimento	60
Etapa 3	1	Desmoldação	5
Tempo total (horas)			10



Figura 5.2: Provets resultantes das experiências iniciais de fabrico.

5.2.3 Processo de fabrico otimizado

Como foi referido nos pontos anteriores, antes de iniciar a preparação do material é necessário construir um molde. A utilização de recipientes de plástico (*e.g.* *decks* de CDs ou caixas do tipo *Tupperware*) mostrou-se funcional, tendo sido estes os recipientes adoptados como molde no âmbito deste trabalho. Na Figura 5.3a mostra-se um exemplo de molde (*deck* de CDs).



Figura 5.3: Material utilizado no processo de fabrico otimizado do Core-Y: (a) exemplo de molde utilizado (*deck* de CDs), (b) cortiça na forma granulada.

Depois de realizadas várias experiências de fabrico, o processo que produziu melhores resultados em termos de qualidade do material, é o que se descreve nos parágrafos seguintes. Este processo será aqui designado por processo otimizado. O primeiro passo consiste na preparação de uma pequena quantidade de resina. Neste âmbito foi utilizada a resina Biresin[®] LS, misturada na proporção 100:10 com o endurecedor Biresin[®] LS. A proporção de endurecedor é intencionalmente menor (cerca de 1% menor) à indicada pelo fabricante de modo a garantir uma cura um pouco mais lenta e, deste modo, minimizar a probabilidade de formação e fixação de bolhas de ar e porosidade no seio do material compósito. Durante todo o processo é necessário considerar que as bolhas de ar se formam quer durante a preparação da resina quer durante a fase de mistura desta com o granulado de cortiça. Na Figura 5.4 mostra-se a fase de medição dos diversos componentes da resina, isto é, a resina e o endurecedor.

Posteriormente, coloca-se no molde uma pequena quantidade de granulado de cortiça e, sobre esta, é vertida lentamente a resina. Depois da primeira camada de cortiça estar coberta e cobre-se a mistura com outra camada de granulado de cortiça, como se mostra na Figura 5.5. Este procedimento é repetido até que o molde esteja preenchido. Durante este procedimento torna-se rapidamente visível a ascensão de algumas bolhas de ar, que deverá continuar até à inexistência de ar ou até à cura total da resina.

Para terminar o processo fecha-se o molde, como se mostra na Figura 5.6, fixando a cobertura mas garantindo que se deixam aberturas suficientes para que o ar possa continuar a sair durante a primeira fase do processo de cura — aqui designada por cura lenta —, que se deverá prolongar durante um tempo não-inferior a 24 horas.

Uma vez terminada a primeira fase de cura lenta, deve levar-se o material/molde à estufa a uma temperatura de cerca de 80°C (ver Figura 5.7) durante 4 a 6 horas, de forma a garantir que se atinge a cura total da resina, evitando a possibilidade de existência de zonas viscosas. Deve notar-se que, para quantidades relativas de endurecedores mais elevadas do que a usada,



(a) Medição da resina Biresin[®] LS.



(b) Medição do endurecedor Biresin[®] LS.

Figura 5.4: Etapa de preparação da resina Biresin[®] LS.



Figura 5.5: Etapa de mistura: disposição em camadas.



Figura 5.6: Etapa de mistura: fecho do molde.

o tempo de cura é menor, sendo suficiente 2 horas à mesma temperatura. Mais suma vez deve referir-se que, quer a fase de aquecimento quer a fase de arrefecimento deverão ser realizadas de forma gradual e com o material já no interior da estufa, para evitar a formação de fissuras por choque térmico.



Figura 5.7: Etapa de cura: introdução do molde na estufa.

De um modo geral, o processo de desmoldação não apresenta dificuldade quando a preparação é feita em recipiente plástico. Os provetes resultantes do processo podem ser vistos na Figura 5.8. Como se pode observar, existe ainda alguma porosidade residual, mas em quantidade substancialmente reduzida e inferior aos provetes representados na Figura 5.2.



Figura 5.8: Provetes resultantes do processo otimizado.

Na Tabela 5.3 esquematizam-se as diversas fases do processo final de fabrico, descritas nos parágrafos anteriores.

Tabela 5.3: Sequências de trabalho da abordagem otimizada ao processo de fabrico.

	Etapas	Material	Tempo
1	Aquisição do molde	Recipiente de plástico	—
2	Preparação da bancada	—	10 min
3	Preparação da resina	Resina + endurecedor	10 min
4	Mistura	Resina + Cortiça + molde	10 min
5	Cura	Material + Estufa	48 h
6	Arrefecimento e desmoldação	—	12 h
Tempo total aproximado (horas)			60 h

5.2.4 Discussão e análise comparativa dos processos de fabrico

Como se pode verificar pela descrição apresentada nos pontos anteriores, foram várias as tentativas realizadas até se atingir um processo de fabrico eficaz para o Core-Y. Num total, realizaram-se cinco experiências ao longo de um período de mais de quatro meses. O maior obstáculo para se alcançar um processo eficaz foi a dificuldade em controlar o tempo de cura da resina e o tempo e processo necessários para libertar eficazmente as bolhas de ar no interior do material.

Na fase de experimentação, a utilização da câmara de vácuo mostrou-se ineficaz, uma vez que a rápida ascensão das bolhas de ar provocada pelo vácuo era frequentemente suficiente para iniciar a reacção irreversível de cura. Ao todo, foram realizadas três experiências em que se utilizou, em diferentes condições, a câmara de vácuo. Estas foram as abordagens que levaram a piores resultados, pela fixação de uma grande quantidade bolhas de ar no interior do material.

Apesar de, entre as tentativas de experimentação e a tentativa final, o tempo total de fabrico ter aumentado significativamente, o tempo de preparação diminui.

Capítulo 6

Ensaaios de compressão axial *quasi*-estática

6.1 Metodologia do ensaio

Para a realização dos ensaios de compressão uniaxial, utilizaram-se doze provetes cilíndricos de Core-Y com as mesmas dimensões ($h = 40$ mm e $\phi = 40$ mm). Os provetes foram produzidos segundo a metodologia apresentada na Secção intitulada “Processo de fabrico optimizado” do Capítulo de Caracterização Experimental. Quatro desses provetes foram utilizados unicamente para a determinação do coeficiente de Poisson e foram sujeitos a um ciclo de ensaio distinto dos restantes. Para garantir a uniformidade dimensional dos provetes, foram maquinados na máquina CNC Haans VF0 do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Na Tabela 6.1 apresentam-se as referências, características e propriedades dos provetes ensaiados.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (Shimadzu™ AG–50kNG). Para tal utilizou-se uma célula de carga de 50 kN. Na Figura 6.2 mostra-se o equipamento utilizado e montagem do provete nos ensaios de compressão.

Em todos os ensaios, os provetes foram simplesmente apoiados numa das faces, sendo a outra comprimida axialmente. Os provetes foram posicionados de modo a que as faces de carregamento fossem o mais possível planas e perfeitas, garantindo assim um carregamento homogeneamente distribuído e resultados representativos.

Durante o ensaio, a carga foi aplicada a velocidade constante até se atingir uma carga máxima de cerca de 45 kN (abaixo do limite da célula de carga). O sistema de aquisição associado à máquina de ensaios permitiu o registo da evolução da força aplicada e do deslocamento das amarras ao longo do ensaio. Com estes dados determinaram-se as curvas tensão-deformação e analisaram-se as propriedades mecânicas fundamentais do material em estudo.

Para averiguar se a velocidade de deformação influencia o comportamento mecânico do material, realizaram-se ensaios a três velocidades de compressão diferentes: $v = 2, 20$ e 200 [mm/min]. Deste modo, organizaram-se os provetes em três grupos de quatro unidades cada, de acordo com a velocidade de ensaio.

Com o objectivo de determinar o coeficiente de Poisson, seleccionaram-se dois provetes de dois grupos diferentes (2 e 20 [mm/min]) e realizaram-se medições sucessivas, com paragem de 1 em 1 mm, ao longo do ensaio de compressão no regime considerado como elástico (até

aproximadamente 8 mm de deslocamento). Em cada medição registou-se o diâmetro no instante de paragem, em duas direcções perpendiculares (ϕ_1 e ϕ_2), bem como o deslocamento correspondente. O coeficiente de Poisson foi então determinado pela razão entre a variação de diâmetro e o deslocamento ($\nu = \frac{\Delta\phi}{d}$).



Figura 6.1: Exemplos de provetes cilíndricos usados nos ensaios de compressão axial *quasi*-estáticos.

6.2 Observações visuais

Nesta secção, observa-se a geometria final dos provetes após ensaio, com o objectivo de se descrever as características e modos de deformação observados. Refere-se também o comportamento ao longo do ensaio de compressão.

A Figura 6.3 mostra a geometria de diferentes provetes em fases de compressão distintas (evolução do ensaio de (a) para (e)). O provete 6.3a corresponde à geometria inicial. No provete 6.3b, são visíveis as primeiras zonas de fissura nas paredes do provete, que determinam o final da região elástica. No provete 6.3c central é visível que as fissuras iniciais conduziram à fragmentação das paredes, o que é ainda mais perceptível no provete 6.3d. Esta fase de deformação corresponde já ao patamar de tensão, onde a perda por desagregação do material conduz a uma redução da tensão registada. O provete 6.3e corresponde à fase final de compressão, em que se perde toda a estrutura inicial e ocorre a compressão progressiva até esmagamento completo. A degradação do provete é acompanhada de estalidos (som tipo crepitação), que são claramente mais intensos nos ensaios à maior velocidade.



(a)

(b)



(c)

Figura 6.2: Ensaio de compressão axial *quasi*-estáticos sobre provetes cilíndricos de Core-Y: (a) máquina universal de ensaios utilizada, (b) pormenor da montagem inicial do provete entre os pratos da máquina e (c) pormenor da montagem final do provete entre os pratos da máquina.

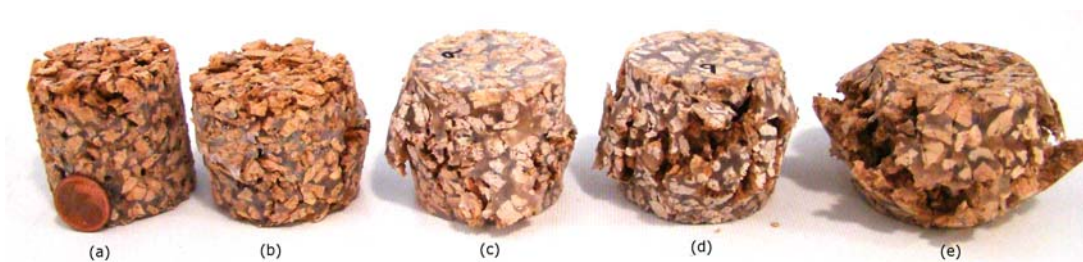


Figura 6.3: Geometria final em estágios diferentes de compressão.

Tabela 6.1: Referências, características e propriedades dos provetes sujeitos a ensaio de compressão axial *quasi*-estáticos.

Referência	v_{ensaio} [mm/min]	h_i [mm]	ϕ_i [mm]	A_i [mm ²]	V_i [mm ³]	m [g]	ρ [kg/m ³]	$V_{\text{cortiça}}$ [%]
ECV002I	2	40	40	156,60	50,2	16,56	326,70	80,6
ECV002II	2					19,15	382,22	75,8
ECV002a	2					14,87	294,85	83,7
ECV002b	2					15,59	308,71	82,4
ECV020I	20					16,67	330,51	80,4
ECV020II	20					15,74	294,85	82,1
ECV020a	20					15,04	311,61	83,4
ECV020b	20					16,03	299,19	81,6
ECV200I	200					17,43	382,22	79,0
ECV200II	200					22,72	347,92	69,2
ECV200III	200					14,77	291,55	83,9
ECV200IV	200					17,36	343,59	79,1
Val. médios						16,83	334,94	80,1

6.3 Resultados e discussão dos ensaios de compressão axial

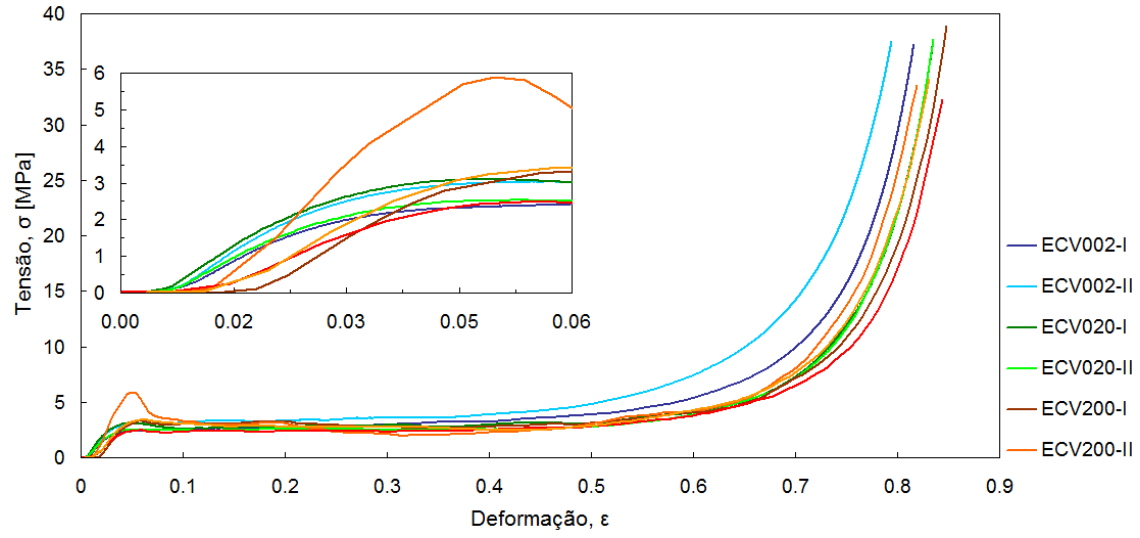
Os resultados em termos de força-deslocamento foram registados e, após tratamento dos mesmos, obtiveram-se as curvas tensão-deformação representadas nos gráficos da Figura 6.4. A partir destes dados analisaram-se as propriedades mecânicas fundamentais do material em estudo, como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão e deformação de patamar.

Para o cálculo da tensão (σ) utilizou-se a força de reacção registada pela máquina de ensaios (F) e a secção inicial do provete (A_i), tal que $\sigma = \frac{F}{A_i}$. Para determinar a deformação (ε) calculou-se a relação entre o deslocamento (d) registado pela máquina de ensaios e a altura inicial do provete (h_i), tal que $\varepsilon = \frac{d}{h_i}$.

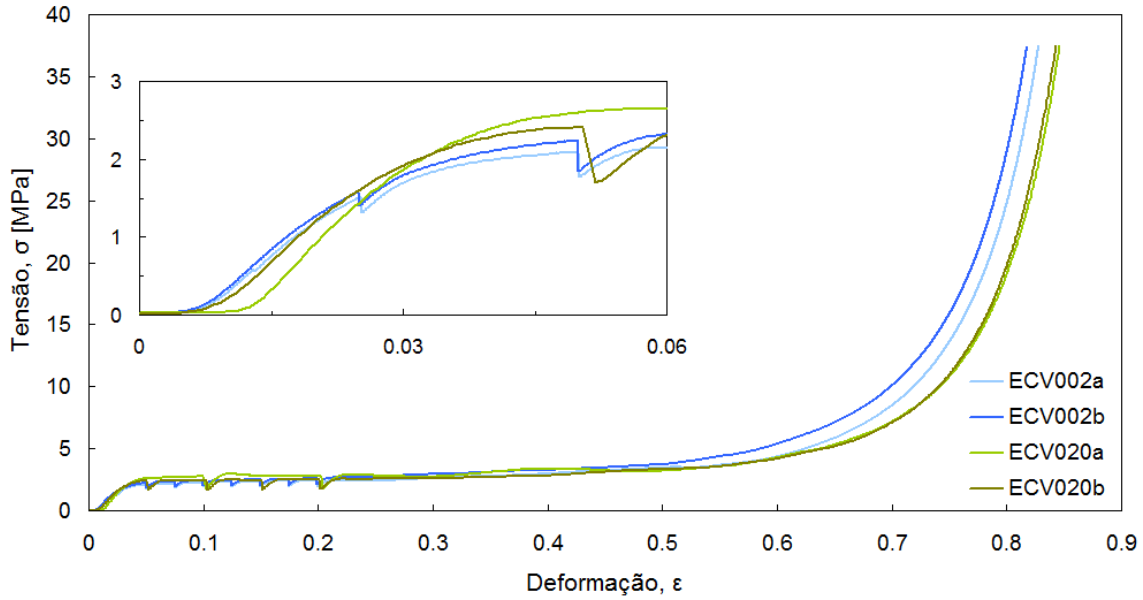
Da observação dos gráficos experimentais, é visível alguma dispersão nas propriedades e no comportamento mecânico do material, devido, possivelmente, à presença de ar/porosidade e à variação na distribuição dos constituintes de cada provete.

No gráfico da Figura 6.4a apresentam-se os resultados experimentais em termos de tensão-deformação, obtidos para os quatro provetes seleccionados para determinação do coeficiente de Poisson. A comparação com os resultados obtidos para os restantes provetes mostra algumas diferenças, em particular no declive inicial da curva, que se apresenta menor no caso dos provetes seleccionados para determinação do coeficiente de Poisson. O facto das medições terem sido realizadas por etapas levou a uma taxa de recuperação do material por relaxamento em cada paragem, conduzindo a resultados distintos. Por este motivo, não se incluiu este grupo de provetes na análise das restantes propriedades mecânicas referidas. Ele serviu apenas para determinação do coeficiente de Poisson.

A observação dos gráficos experimentais revela um intervalo inicial em que os valores de deformação e de tensão são muito baixos ($\varepsilon < 1\%$ e $\sigma < 50$ kPa). Este comportamento pode explicar-se pela adaptação inicial do prato da máquina de ensaios à superfície do provete. O facto da superfícies de contacto ser irregular — levando a uma área de contacto reduzida — conduz a níveis baixos de resistência, o que explica os valores de tensão registados. Assim



(a)



(b)

Figura 6.4: (a) Curvas experimentais tensão-deformação obtidas dos ensaios de compressão do Core-Y com pormenor da região elástica, (b) Curvas experimentais tensão-deformação obtidas dos ensaios de compressão do Core-Y dos provetes usados para medição do coeficiente de Poisson com pormenor da região elástica.

que esta superfície se torna regular, por efeito do esmagamento, a área de contacto do provete aumenta, aumentando gradualmente a tensão registada.

São ainda visíveis três regiões distintas. Numa primeira, para deformações inferiores a 6%, o comportamento apresenta-se elástico, sendo o módulo de elasticidade determinado pela tangente na origem da curva tensão-deformação. Nesta fase, que corresponde à região de deformação elástica, as tensões e deformações são as mais baixas.

No que diz respeito aos valores do módulo de elasticidade (E) determinados a partir das curvas de compressão, observa-se que não há diferenças significativas entre os provetes, sendo o valor médio da ordem de 120 MPa. Na Tabela 6.2 apresentam-se os resultados relativos ao módulo de elasticidade.

É visível um comportamento muito particular dos provetes ECV200II e ECV200III. O primeiro apresenta um módulo de elasticidade muito elevado (da ordem dos 200MPa) e o segundo muito baixo (76 MPa), quando comparados com o valor médio de módulo de elasticidade (120 MPa). Esta discrepância deve-se, possivelmente, ao diferente comportamento à compressão. O primeiro provete (ECV200II) terá resistido consideravelmente mais à compressão que os restantes provetes e por isso apresenta um declive mais acentuado no início da curva. O segundo (ECV200III) terá resistido consideravelmente menos (maior porosidade, *etc.*), desagregando-se rapidamente e por isso apresenta um declive menos acentuado no início da curva. Neste sentido, porque se afastam ambos do valor médio de comportamento, os dois provetes não foram considerados na determinação das propriedades mecânicas.

A segunda região, a região de patamar, compreendida, aproximadamente, entre os 6 e os 60% de deformação, apresenta um declive relativamente baixo. Este patamar ocorre para uma tensão $2 < \sigma_p < 5$ [MPa] e deve-se principalmente à fragmentação do provete e ao esmagamento progressivo das paredes celulares da cortiça. Na realidade, não existe um patamar perfeitamente horizontal. A tensão σ_p aumenta ligeiramente durante a propagação da onda de colapso na estrutura devido à sua heterogeneidade, formando uma "barreira" que é necessário vencer. Existem pequenas variações da tensão de patamar devido às súbitas perdas de material por fragmentação. A perda de material leva a uma diminuição da área de contacto do provete, levando a que a força de reacção também abrande, diminuindo a tensão de patamar. Na Tabela 6.3 apresenta-se a determinação da tensão de patamar para cada provete, como a razão entre a força registada no início da tensão de patamar e a área inicial do provete. A deformação de patamar determina-se intersectando a tensão de patamar com o declive inicial elástico e estima-se na ordem dos 4%.

Por fim, a região de densificação corresponde à zona de maior de declive, onde a tensão sobe rapidamente com a deformação. Esta região chega a atingir 85% de deformação e corresponde à densificação total do material, provocando um aumento acentuado da tensão. A região de densificação apresenta-se quase paralela entre os diferentes ensaios e, ainda que não seja uma propriedade mecânica do material, considera-se pertinente determinar o módulo de rigidez de densificação. O módulo determina-se considerando o declive entre dois pontos da recta tangente ao final da curva (Tabela 6.4).

O gráfico da Figura 6.4 mostra também que o comportamento do Core-Y à compressão não varia significativamente com a velocidade de deformação, dado que não se verificam diferenças significativas entre ensaios para diferentes velocidades de compressão.

As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam os resultados obtidos relativamente ao coeficiente de Poisson. O número de medições efectuadas para a velocidade de 20 mm/min revelou-se claramente insuficiente, existindo, para o caso do provete ECV020b, apenas duas medições. Devido à rápida deslocação, não foi possível precisar os momentos de paragem para o registo das medições

Tabela 6.2: Determinação do módulo de elasticidade pela tangente na origem da curva tensão-deformação.

Referência	Medição	d_i [mm]	F_i [kN]	d_f [mm]	F_f [kN]	$\frac{h_i}{A_i}$ [mm ⁻¹]	E [MPa]
ECV002I	1	0,424	463	0,713	1450	0,0317	108,49
	2	0,431	488	0,651	1250		110,04
ECV002II	1	0,363	400	0,698	1810	0,0318	133,91
	2	0,383	475	0,646	1610		137,36
ECV020I	1	0,326	444	0,593	1590	0,0319	136,73
	2	0,351	588	0,726	20803		127,16
ECV020II	1	0,377	12,5	0,710	1560	0,0319	148,63
	2	0,360	350	0,677	1460		112,06
ECV200I	1	0,885	588	1,39	2560	0,0318	125,52
	3	1,22	195E0	1,55	3090		109,10
ECV200II	1	0,823	1860	1,32	5130	0,0319	209,05
	2	0,489	163	1,32	5130		190,33
ECV200III	1	0,747	738	1,42	2460	0,0319	82,35
	2	1,08	1730	1,42	2460		70,63
ECV200IV	1	0,785	788	0,952	1450	0,0318	126,05
	2	0,454	75,0	0,952	1450		87,73
Val. Médio							121,90

Tabela 6.3: Determinação da tensão de patamar para cada provete, como a razão entre a força registrada no início da tensão de patamar F_p e a área inicial do provete A_i .

	Vensaio [mm/min]	F_p [kN]	A_i [mm ²]	$\sigma = \frac{F_c}{A_i}$ [MPa]
ECV002I	2	3162,5	1263,55	2,50
ECV002II	2	3787,5	1256,00	3,02
ECV020I	20	3518,75	1257,05	2,80
ECV020II	20	3162,5	1258,72	2,51
ECV200I	200	3762,5	1254,33	3,00
ECV200IV	200	4050,0	1261,03	3,21
Val. Médio				2,84

Tabela 6.4: Determinação do módulo de rigidez de densificação pelo declive entre dois pontos da recta tangente ao final da curva.

Referência	v_{ensaio}	σ_i [MPa]	ε_i	σ_f [MPa]	ε_f	Mód. densificação [MPa]
ECV002I	2	37,0089	0,8158	36,0097	0.8140	517.5103
ECV002II	2	37,0123	0,7934	36,0171	0.7913	
ECV020I	20	37,0412	0,8343	36,0368	0.8327	614.8266
ECV020II	20	37,2203	0,8345	36,4655	0.8333	
ECV200I	200	38,8655	0,8484	36,3642	0.8442	531.1273
ECV200IV	200	34,0793	0,8308	30,1639	0.8225	
Val. Médio						554,4881

necessárias. A comparação gráfica dos resultados obtidos para as duas velocidades de ensaio permite concluir que não há uma dependência do coeficiente de Poisson da velocidade de deformação. Neste sentido, exclui-se este grupo de medições para determinação do coeficiente de Poisson.

No gráfico da Figura 6.5 apresenta-se um estudo do coeficiente de Poisson para a menor velocidade de ensaio em função do deslocamento e das direcções de medição.

Tabela 6.5: Valores experimentais do deslocamento (d), do diâmetro (ϕ_1 e ϕ_2) e do coeficiente de Poisson nas duas direcções perpendiculares (ν_1 e ν_2), $v=2$ mm/min.

Referência	d [mm]	ϕ_1 [mm]	ν_2 []	ϕ_2 [mm]	ν_2 []
ECV002a	1,013	40,11	0,11	40,11	0,11
	2,005	40,28	0,14	40,27	0,13
	3,005	40,43	0,14	40,32	0,11
	4,009	40,59	0,15	40,46	0,11
	5,001	40,87	0,17	40,58	0,12
	5,997	41,29	0,22	41,07	0,18
	7,008	41,66	0,24	41,29	0,18
	8,011	42,03	0,25	41,88	0,23
ECV002b	1,005	40,08	0,08	40,15	0,15
	2,006	40,35	0,17	40,53	0,26
	3,015	40,24	0,08	40,53	0,18
	4,008	40,56	0,14	40,68	0,17
	5,004	40,50	0,10	40,97	0,19
	5,986	40,59	0,10	40,92	0,15
	7,005	41,23	0,18	41,14	0,16
	7,988	41,64	0,21	41,37	0,17

Não é visível um comportamento distinto em função da direcção de medição. Neste sentido, pode concluir-se que o coeficiente de Poisson do material em estudo não depende da direcção de medição.

Em cada provete, os valores de coeficiente de Poisson determinados conduzem a duas regiões lineares distintas, o que leva a concluir que, em muitas das medições registadas, o

Tabela 6.6: Valores experimentais do deslocamento (d), do diâmetro (ϕ_1 e ϕ_2) e do coeficiente de Poisson nas duas direcções perpendiculares (ν_1 e ν_2), $v = 20$ mm/min.

Referência	d	ϕ_1	ν_1	ϕ_2	ν_2
	[mm]	[mm]	[]	[mm]	[]
ECV020a	2,63	40,50	0,19	40,45	0,17
	4,125	40,67	0,16	40,96	0,23
	6,051	41,43	0,24	41,36	0,22
	8,074	43,88	0,48	42,92	0,36
ECV020b	4,098	40,53	0,13	40,49	0,12
	8,16	43,36	0,41	41,56	0,19

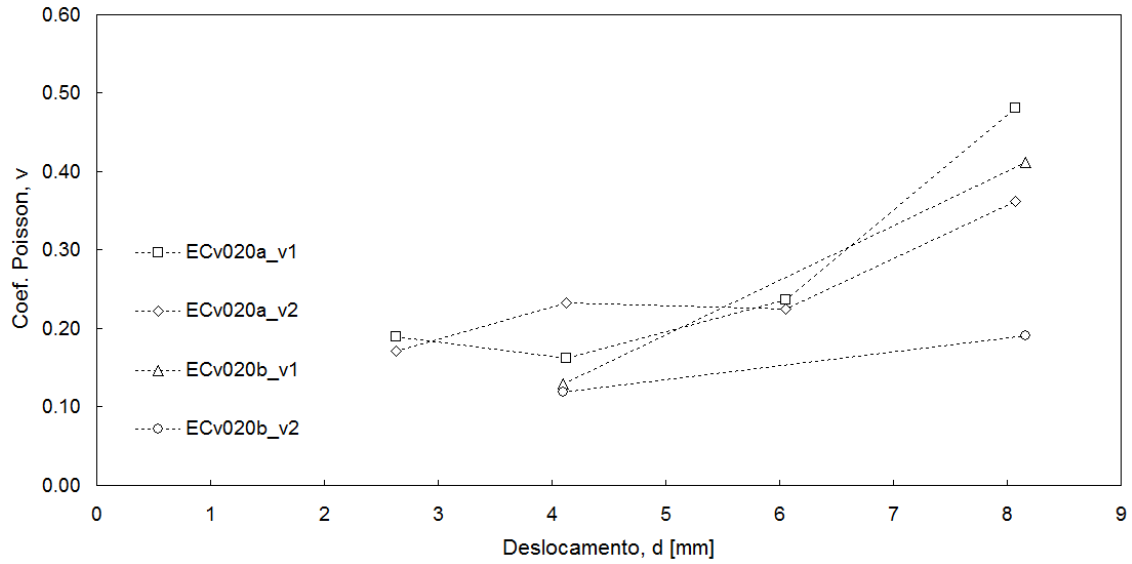


Figura 6.5: Curva experimental do coeficiente de Poisson (ν) em função do deslocamento (d), $v = 2$ mm/min.

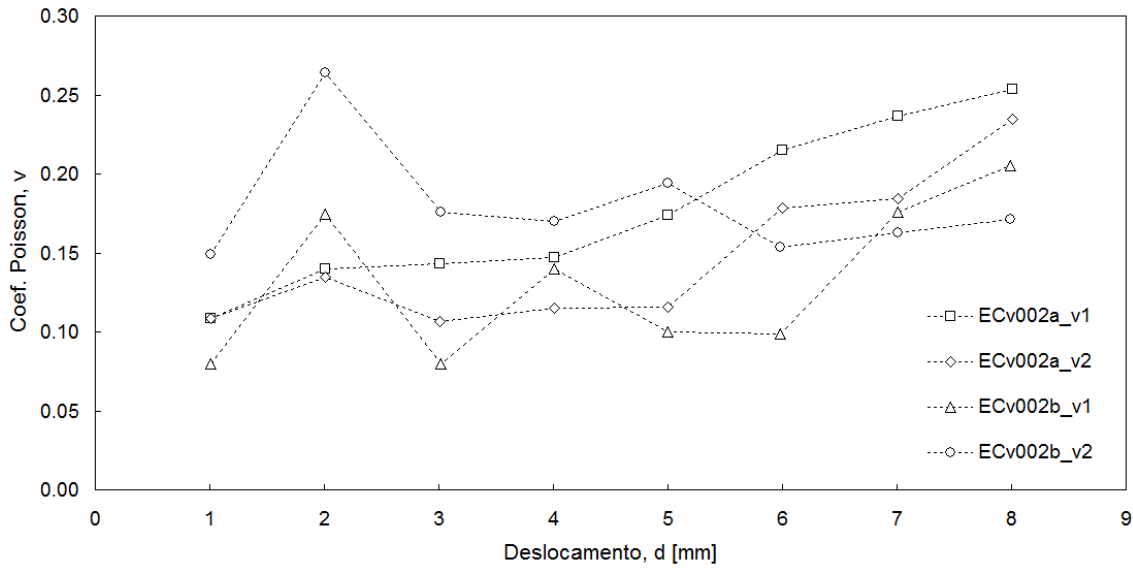


Figura 6.6: Pontos experimentais do coeficiente de Poisson (ν) em função do deslocamento (d), $v = 20$ mm/min.

material já teria ultrapassado o regime elástico. Deste modo, há que diferenciar um coeficiente de Poisson elástico, passível de ser determinado para deslocamentos inferiores a 4 mm, e um coeficiente de Poisson plástico, passível de ser determinado a partir da restante região do gráfico. O material sofre excessiva fragmentação após a região elástica e as medições registadas para a região plástica não são suficientes nem representativas de toda a região plástica do material. Por esse motivo, focamos o estudo do coeficiente de Poisson apenas na região elástica.

Realizou-se uma aproximação linear dos pontos experimentais de cada provete com o objectivo de estudar a variação do coeficiente de Poisson com o deslocamento (Figuras 6.7 e 6.8. Avaliou-se a equação da recta aproximada e o respectivo coeficiente de correlação R^2 . As equações e parâmetros resultantes relativos aos provetes ECV002a e ECVV002b, são apresentados na Tabela 6.7. As equações 1, 2, 5 e 6 da Tabela 6.7 dizem respeito às duas direcções de medição na região elástica e as equações 3, 4, 7 e 8 às duas direcções de medição na região plástica.

O coeficiente de correlação indica-nos a proximidade dos pontos experimentais à recta considerada como média (considerou-se que $R^2 > 0,95$ seria indicativo de uma boa aproximação). Globalmente, este coeficiente apresenta-se baixo (em especial para os pontos da região elástica), tornando-se necessário avaliar a possibilidade de alguns dos pontos experimentais serem ou não excluídos. No entanto, dado o reduzido número de medições, arranjar um método fiável para a selecção desses pontos torna-se impraticável. Concluiu-se que o método utilizado para determinar o coeficiente de Poisson não terá sido o mais adequado. Assim, este coeficiente foi determinado pela média de todos os pontos experimentais correspondentes a um deslocamento inferior a 3 mm (Tabela 6.8).

Na Tabela 6.9 apresenta-se um resumo das propriedades mecânicas do Core-Y determinadas.

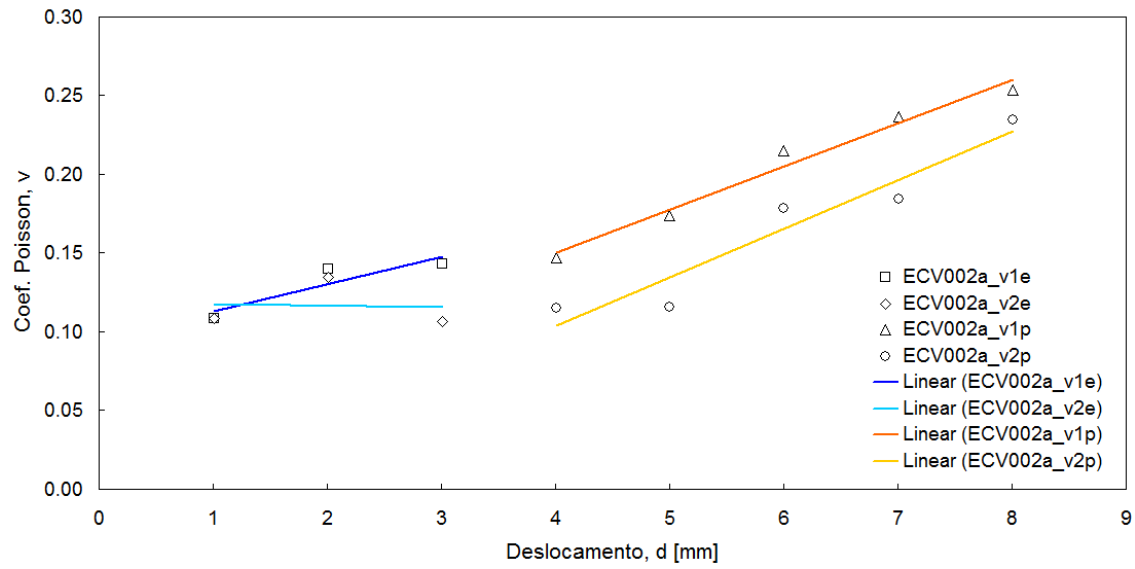


Figura 6.7: Aproximação linear dos pontos experimentais do coeficiente de Poisson (ν) em função do deslocamento (d) para o provete ECV002a.

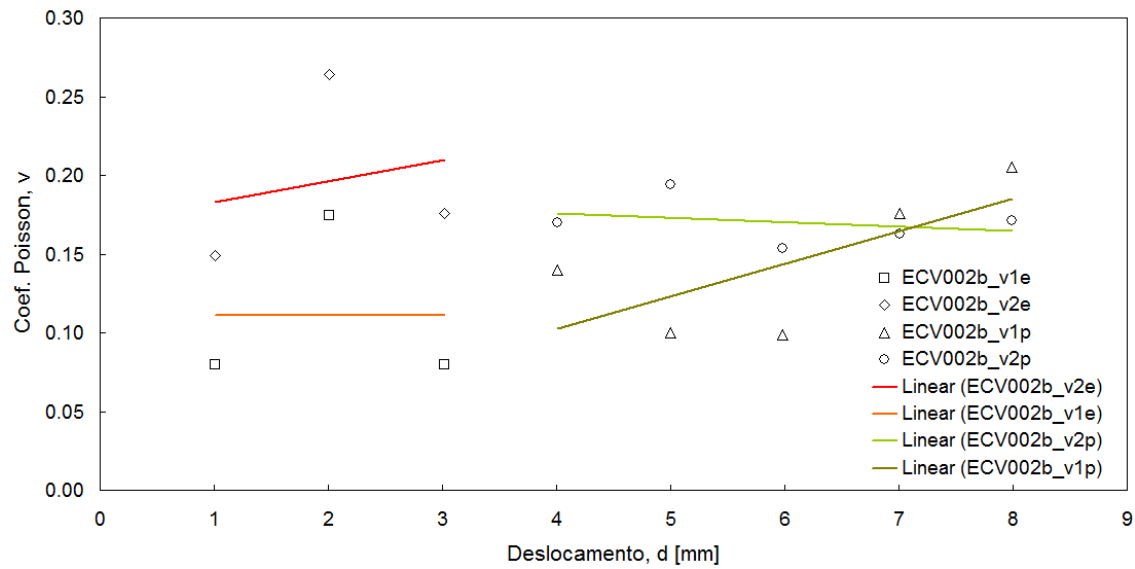


Figura 6.8: Aproximação linear dos pontos experimentais do coeficiente de Poisson (ν) em função do deslocamento (d) para o provete ECV002b.

Tabela 6.7: Equações e parâmetros resultantes da aproximação linear dos pontos experimentais dos provetes ECV002a e ECV002b.

Referência do provete	Referência da equação	R^2	Equação
ECV002a	1	0,08223	$\nu(d) = 0,0173d + 0,0957$
	2	0,0048	$\nu(d) = -0,0011d + 0,1188$
	3	0,9754	$\nu(d) = 0,0275d + 0,0402$
	4	0,0186	$\nu(d) = 0,0308d - 0,0192$
ECV002b	5	5×10^{-6}	$\nu(d) = -0,0001d + 0,1115$
	6	0,0476	$\nu(d) = 0,0131d + 0,1702$
	7	0,4902	$\nu(d) = 0,0208d + 0,0189$
	8	0,0835	$\nu(d) = -0,0027d + 0,1867$

Tabela 6.8: Valor médio do coeficiente de Poisson obtido para os dois provetes ensaiados à $v = 2$ mm/min.

Referência	ν_1	ν_2	$\nu_{\text{médio}}$
ECV002a	0,11	0,11	
	0,14	0,13	
	0,14	0,11	0,14
ECV002b	0,08	0,15	
	0,17	0,26	
	0,08	0,18	

Tabela 6.9: Propriedades mecânicas do Core-Y determinadas a partir dos ensaios de compressão axial *quasi*-estáticos.

E	ρ	ν	ε_p	σ_p
[MPa]	[kg/m ³]	[]	[%]	[MPa]
121,90	314,94	0,14	5	2,84

6.4 Curva de comportamento médio

Na Figura 6.9 apresenta-se a curva de comportamento médio relativa aos resultados experimentais apresentados na secção anterior. A curva foi obtida por média aritmética dos provetes considerados como relevantes para determinação das propriedades mecânicas fundamentais. Para este efeito excluíram-se os quatro provetes utilizados para a determinação do coeficiente de Poisson e os dois que se distanciaram mais dos valores médios determinados — ECV200II e ECV200III.

A partir da curva média experimental, analisaram-se as mesmas propriedades estudadas na secção anterior e fez-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos pelas duas abordagens. A determinação das propriedades seguiu a metodologia referida na secção anterior, sendo os resultados apresentados na Tabela 6.10.

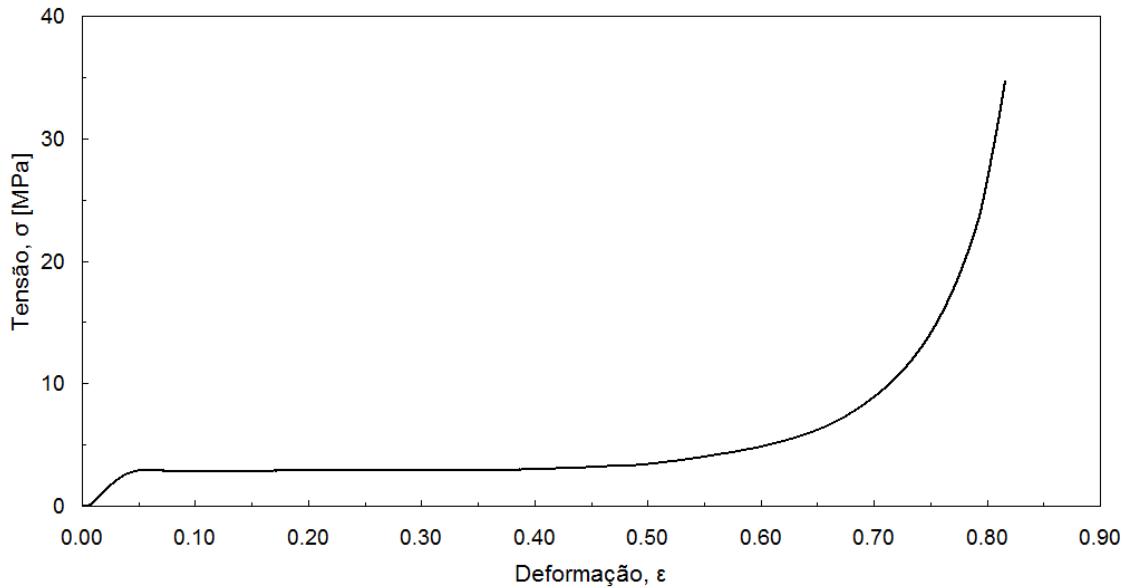


Figura 6.9: Curva de comportamento médio obtida por média aritmética dos provetes considerados como relevantes para determinação das propriedades mecânicas fundamentais.

Tabela 6.10: Propriedades mecânicas do Core-Y determinadas a partir da curva média experimental.

E	ρ	ν	ϵ_p	σ_p
[MPa]	[kg/m ³]	[]	[%]	[MPa]
91,38	314,94	0,14	3,8	2,78

À excepção do módulo de elasticidade, as restantes propriedades não apresentam diferenças significativas relativamente às determinadas na secção anterior. Porém, o módulo de elasticidade apresenta um desvio significativo, de aproximadamente 33%.

A metodologia apresentada na secção anterior conduz a uma maior acumulação de erros de leitura. Enquanto no estudo anterior o cálculo da média era realizado após a determinação das propriedades em cada ensaio, no estudo de comportamento médio, essas propriedades são

determinadas a partir da curva média. Neste sentido, as propriedades determinadas a partir da curva média apresentam menor acumulação de erros de leitura, sendo por isso eventualmente mais correctas.

Para efeito de comparação apresentam-se as propriedades da cortiça na Tabela 6.11.

Tabela 6.11: Propriedades mecânicas da cortiça [1].

Módulo de Young	Tangencial	$13 \pm 5 \text{ MN/m}^2$
	Axial	$13 \pm 5 \text{ MN/m}^2$
	Radial	$20 \pm 7 \text{ MN/m}^2$
Módulo de corte	no plano 1-2	$4,3 \pm 1,5 \text{ MN/m}^2$
	no plano 1-3	$2,5 \pm 1,0 \text{ MN/m}^2$
	no plano 2-3	$2,5 \pm 1,0 \text{ MN/m}^2$
Coeficiente de Poisson		$0,25^a\text{-}0,50$ $0\text{-}0,10^a$
Tensão (e deformação) de colapso	Tangencial	$0,7 \pm 0,2 \text{ MN/m}^2$, 6%
	Axial	$0,7 \pm 0,2 \text{ MN/m}^2$, 6%
	Radial	$0,8 \pm 0,29 \text{ MN/m}^2$, 4%
Tensão (e deformação) de rotura	Tangencial	$1,1 \pm 0,2 \text{ MN/m}^2$, 9%
	Axial	$1,1 \pm 0,2 \text{ MN/m}^2$, 9%
	Radial	$1,0 \pm 0,2 \text{ MN/m}^2$, 5%
Tenacidade		$60\text{-}130 \text{ MPa m}^{1/2b}$
Coeficiente de perda (a 0,01 Hz)	Tangencial	0,3 a 20%
	Radial	0,1 a 1%

6.5 Conclusões

De uma forma geral, as curvas experimentais tensão-deformação do material compósito Core-Y enquadram-se no comportamento previsto para materiais celulares. Gráficamente revelam-se três regiões de comportamento distintas, nomeadamente, elástica, de patamar e de densificação. Verificou-se experimentalmente que a região elástica não ultrapassou em nenhum ensaio os 6% de deformação. A deformação máxima registada ($\approx 85\%$) é também uma característica comum aos materiais desta classe.

As curvas experimentais obtidas realçam algumas diferenças entre os diferentes ensaios, em especial no caso da região elástica, podendo-se apontar algumas hipóteses para este facto. A hipótese mais evidente relaciona-se com a diferença da composição dos provetes, a nível da fracção volúmica de cada constituinte, e com a existência de ar. Por outro lado, apesar de os ensaios experimentais terem sido realizados com o maior cuidado e repetibilidade possível, os valores registados podem ter sido condicionados por pequenos ajustes iniciais dos pratos da máquina de ensaio às faces dos provetes. Outra hipótese para a diferença referida pode estar relacionada com a ocorrência de micro fissuração inicial que se propaga durante a fase de aplicação do carregamento. Esta fissuração pode ser mais ou menos evidente em função, por um lado, do modo de cura da resina (podendo, ainda na fase de fabrico, formar-se zonas mais frágeis), por outro, da maior fracção volúmica de ar/porosidade que o provete possa conter.

Relativamente ao procedimento adoptado para determinar o coeficiente de Poisson, teria sido mais rigorosa a utilização de vídeo-extensómetros. No entanto, dado que o material se

desagrega, teria sido difícil manter o registo fiável a partir desta alternativa.

Capítulo 7

Ensaio de vibração livre

7.1 Introdução

As frequências naturais de um corpo são dependentes da sua geometria, propriedades do seu material e condições de fronteira. Assim, o conhecimento prévio ou a imposição destes parâmetros permite determinar um deles a partir das frequências naturais do objecto em teste.

Uma aplicação prática desta metodologia consiste na determinação experimental das frequências naturais de um objecto com uma geometria simples (por exemplo uma viga) devidamente suportado de forma a garantir as condições de fronteira que se pretende prescrever. Contrariamente aos métodos de caracterização estáticos, o resultado deste método é dependente de duas características independentes do objecto: a sua massa, que depende directamente e proporcionalmente da massa volúmica do material, e a sua rigidez, que depende da configuração do objecto, do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson do material.

Neste sentido, utilizou-se um provete com a forma de uma viga recorrendo à teoria de vibração de flexão de vigas para desenvolver o modelo analítico que permite determinar o valor do módulo de elasticidade do material em função dos valores das frequências naturais da viga, da sua massa e suas dimensões. A seguinte equação [60] é usada para determinação do módulo de elasticidade (E), a partir do conhecimento da frequência natural de vibração (f) correspondente aos modos de flexão transversal de uma viga:

$$\omega_i = (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \text{ [rad/s]} \quad (7.1)$$

ou, tendo em conta que $\omega = 2\pi f$:

$$f_i = \frac{(\beta l)_i^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \text{ [Hz]} \quad (7.2)$$

Para o caso particular do ensaio desenvolvido, as duas extremidades da viga encontram-se livres. Deste modo, tendo por base a Tabela 7.1 [60] e considerando apenas o modo natural fundamental ($i = 1$) o valor do parâmetro $(\beta l)^2$ é igual a 22,37.

As equações 7.3 e 7.4 apresentam as formas naturais correspondentes ao caso particular do ensaio desenvolvido (duas extremidades da viga livres).

$$C_n (\cosh \beta_n X + \cos \beta_n X - \alpha_n (\sinh \beta_n X - \sin \beta_n X)) \quad (7.3)$$

Tabela 7.1: Frequências e formas naturais para vigas com extremidades livres [60].

Equação de frequências	Raízes $(\beta_x l)_i$	Raízes $(\beta_x l)_i^2$	α_n	Posições nodais
	0	0	0,9825	
	4,7300	22,37	1,0008	0,224/0,776
	7,8532	61,66	0,9999	0,132/0,5/0,868
$\cos \beta l \cos \beta l = 1$	10,9956	120,9	1,0000	0,094/0,356/0,644/0,906
	14,1272	199,9	0,9999	0,073/0,277/0,5/0,927
	17,2787			
	$\frac{(2n+a)\pi}{2}$			

$$\alpha_n = \frac{\cosh \beta_n - \cos \beta_n l}{\sinh \beta_n - \sin \beta_n l} \quad (7.4)$$

7.2 Metodologia de ensaio

Para a realização dos ensaios de vibração livre, foram preparadas quatro vigas ($30 \times 30 \times 200$ [mm³]). Os provetes foram produzidos segundo a metodologia apresentada na secção “Processo de fabrico otimizado” do Capítulo “Processo de fabrico do Core-Y”. Os provetes foram maquinados na máquina CNC do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Cada viga foi referenciada de acordo com o tipo de ensaio (“EVL” – ensaio de vibração livre) e a série do provete. Na Tabela 7.2 apresentam-se as referências e as propriedades médias das vigas ensaiadas.



Figura 7.1: Provetes paralelepípedicos usados no ensaio de vibração.

As vigas foram suspensas num pórtico rígido de suporte, através de fios finos inextensíveis, de forma a obter condições de fronteira da montagem experimental próximas das condições

Tabela 7.2: Referências, propriedades relevantes e percentagens relativas de cortiça dos provetes prismáticos utilizados no ensaio de vibração.

Referência	h [mm]	l [mm]	e [mm]	A [mm ²]	V [mm ³]	m [g]	ρ [kg/m ³]	I [mm ⁴]	$V_{rel,cortiça}$ [%]
EVL1	200	30	30	900	180000	60,37	331	6,92E+04	80,5
EVL2						63,99	352	6,88E+04	78,5
EVL3						54,80	301	6,93E+04	83,3
EVL4						57,29	313	6,95E+04	82,1

Com, $A = h \times e$, $V = l \times h \times e$, $I = \frac{h^4}{12}$ e $\rho = \frac{m}{V}$.

livre-livre adoptadas no modelo analítico. Utilizou-se um excitador electrodinâmico TIRA5502 para aplicar uma excitação aleatória na gama de frequências entre 100 e 1100 Hz ligado ao centro da viga suspensa através de uma cabeça de impedância *Dytran* 5860B. Os sinais adquiridos pela cabeça de impedância, representativos da força aplicada e da resposta da viga no ponto de excitação, foram condicionados e analisados num analisador espectral *Spectral Dynamics Siglab 2042*, obtendo-se assim a função de resposta em frequência directa em termos de aceleração para cada uma das vigas na vizinhança do modo natural fundamental. Uma vez identificada a frequência natural, o módulo de elasticidade foi determinado a partir da equação 7.2, que o relaciona com a frequência natural do material.

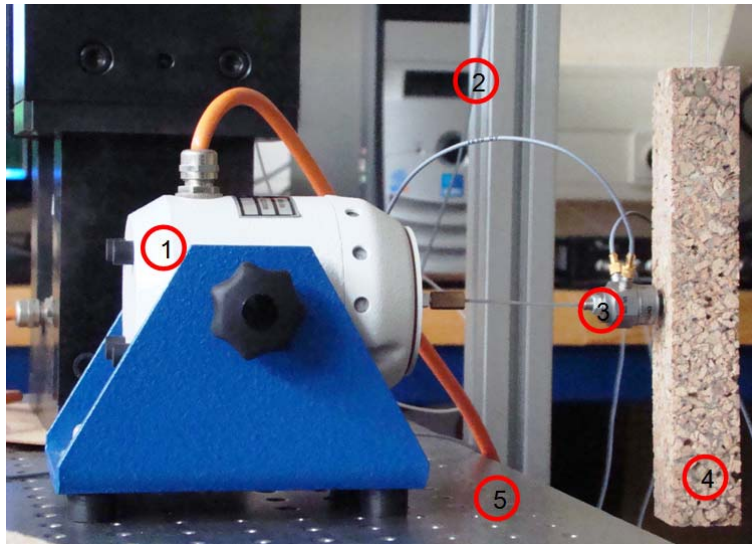


Figura 7.2: Montagem do ensaio de vibração livre. LEGENDA: 1 Excitador electrodinâmico, 2 Suporte para o provete, 3 Cabeça de impedância, 4 Provete, 5 Mesa.

7.3 Tratamento de resultados

7.3.1 Procedimento em MATLAB

Após a aquisição de dados do ensaio de vibração, foi efectuado o seu tratamento recorrendo ao *software* MATLAB. O ficheiro obtido pelo *software* de aquisição de dados é do tipo *.vna.

Para ser possível o seu processamento no MATLAB, este foi convertido para formato *.mat. Em seguida, foi filtrada a informação necessária ao cálculo do módulo de elasticidade.

Uma vez que a função de resposta em frequência obtida pelo *software* de aquisição de dados é do tipo aceleração, é necessário que essa função seja convertida para receptância. A conversão é efectuada por dupla integração da aceleração, para o que se recorreu à função “convert-frf”. Analisando a função receptância (Figura 7.3), é possível identificar um valor médio para a frequência natural fundamental no 3º modo 500Hz, sendo também evidente o amortecimento significativo apresentado pelo material.

De forma a identificar os parâmetros nodais das vigas, nomeadamente a 1º frequência natural e correspondente razão de amortecimento nodal, recorre-se à técnica do ajuste à circunferência (*circle-fit*), aplicando uma rotina em MATLAB. Para aplicar a técnica começa-se pela selecção de um intervalo de frequências da função de transferência, no qual se encontra a frequência natural do material. A partir desse intervalo, são devolvidos pela função os valores das frequências naturais de vibração, factor de perda e respectivo desvio padrão. Esta função permite ainda a visualização gráfica da fase, da componente imaginária e da componente real da função de transferência. Abaixo apresenta-se o código MATLAB usado.

load viga-cortical.vna -mat	importação e conversão de dados
f=SLm.fdxvec;	vector de frequência
FRF=SLm.xcmeas(5).xfer;	função de transferência medida
figure(1); semilogy(f,abs(FRF));	gráfico da função de transferência
f=f';	transposição do vector de frequências
FRF=convert-frf(f,FRF,'ss');	função de conversão de aceleração para receptância
circle-fit(f,FRF(:,1),[])	aplicação da função circle-fit

A Figura 7.4 mostra os dados devolvidos pela função *circle-fit* (dados relativos ao ensaio do provete 1).

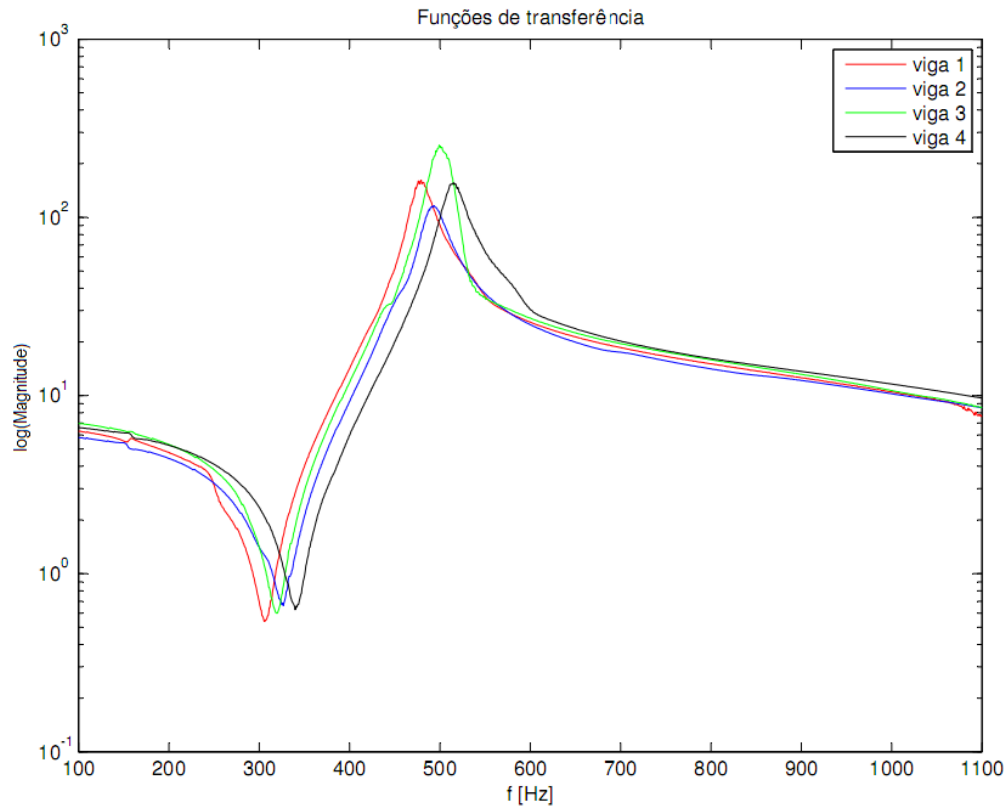
De acordo com a representação da Figura 7.4 a frequência natural pode ser identificada pelo pico de magnitude da função de resposta em frequência, pelo cruzamento da componente real no eixo das abcissas ou pelo valor correspondente ao pico de componente imaginária. A Tabela 7.3 apresenta, para cada provete, os valores obtidos para estes parâmetros.

Tabela 7.3: Dados devolvidos pela função *circle-fit*, para cada provete.

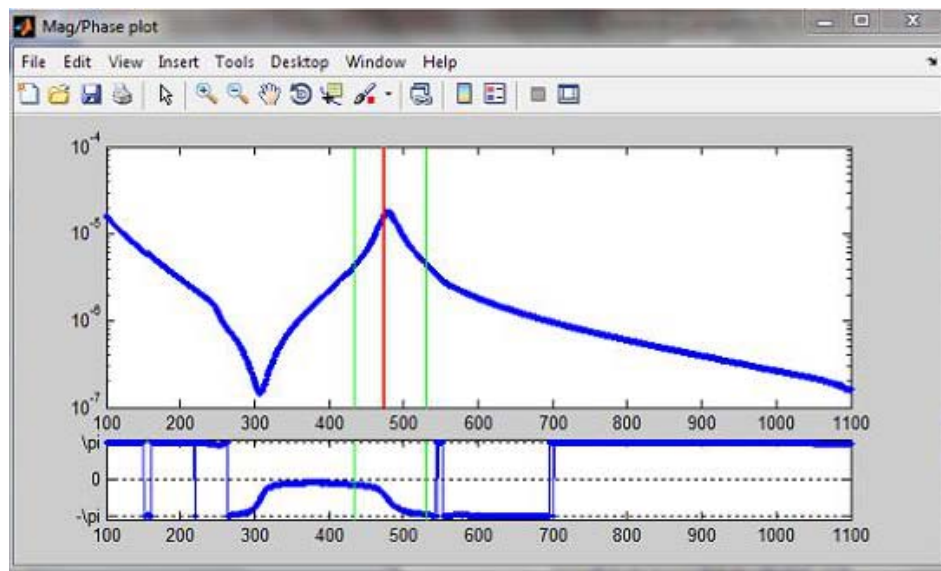
Provete	Real(FRF) [Hz]	Máx. Imag. [Hz]	Máx. Magn. [Hz]	Factor de perda (η) []	Desvio padrão [Hz]
EVL1	477,1899	478,0056	474,0989	0,043437	0,0036103
EVL2	489,0585	490,9897	489,1852	0,048335	0,031358
EVL3	507,3698	687,6053	507,8727	0,038643	0,002695
EVL4	512,187	512,8998	516,6588	0,047924	0,0014435

7.3.2 Aplicação da teoria de vibração de flexão de vigas

Para a obtenção do módulo de elasticidade de cada provete recorreu à expressão 7.5, deduzida a partir da equação 7.2. Como é possível verificar, a expressão relaciona directamente o valor do módulo de elasticidade com a frequência natural. Uma vez que a função *circle-fit* devolve três valores de frequência, começou por se determinar o módulo de elasticidade para cada



(a)



(b)

Figura 7.3: (a) Funções de resposta em frequência obtidas para cada viga, (b) Fase da função de resposta em frequência.

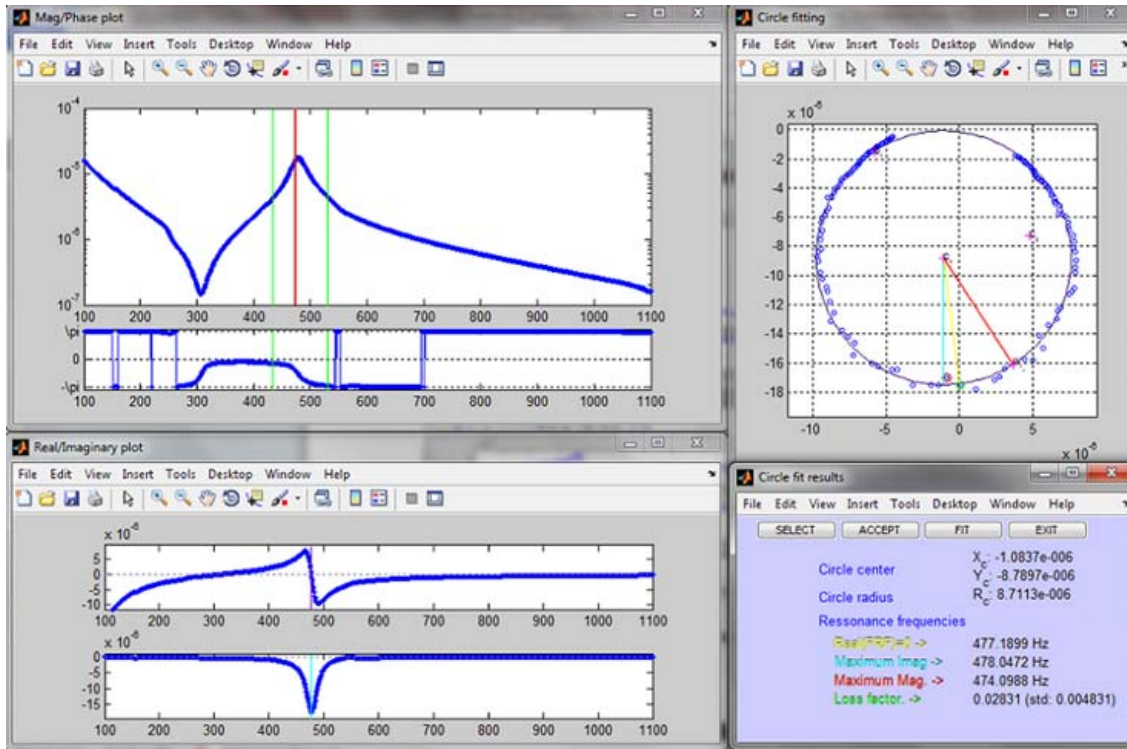


Figura 7.4: Função *circle-fit* e respectivos dados devolvidos.

uma delas. Na Tabela 7.4 apresentam-se os valores obtidos. Seguidamente, determinou-se a média entre a magnitude e a componente imaginária da frequência (Tabela 7.3), sendo estas as que apresentavam os valores mais próximos entre as três frequências devolvidas pela função *circle-fit*. A partir desta, determinou-se o módulo de elasticidade, que se apresenta na Tabela 7.4).

Por fim, foi calculado o desvio absoluto entre os primeiros valores obtidos e os segundos e, dado que o desvio não era consideravelmente diferente, optou-se por considerar o módulo de elasticidade determinado pela média da magnitude e da componente imaginária da frequência, isto é,

$$E = \frac{f_i \times 2\pi}{(\beta l)_i^2} + \frac{\rho A l^4}{I}. \quad (7.5)$$

7.4 Resultados e discussão

Na Tabela 7.7 apresentam-se os valores médios do módulo de elasticidade (E), coeficiente de amortecimento (η), volume relativo de resina (V_{resina}) e densidade (ρ) para os resultados de módulo de elasticidade encontrados pelo ensaio de vibração.

Na Tabela 7.8 apresenta-se uma visão comparativa dos resultados obtidos pelos dois ensaios.

Partindo de um raciocínio simples, seria de esperar que os resultados obtidos estivessem de acordo com uma relação básica. Seria de esperar que, para valores mais altos de módulo

Tabela 7.4: Valores de módulo de elasticidade e desvio padrão de cada provete obtidos recorrendo à frequência natural de vibração da componente real da função de transferência (E_{real}), à frequência natural de vibração da componente imaginária da função de transferência (E_{imag}) e à frequência natural de vibração da magnitude da função de transferência (E_{mag}).

Referência	$(\beta l)^2$ [m ²]	I [m ⁴]	E_{real} [Pa]	δ_{real} [%]	E_{imag} [Pa]	δ_{imag} [%]	E_{mag} [Pa]	δ_{mag} [%]
EVL1	22,37	$6,92 \times 10^{-8}$	$1,25 \times 10^8$	0,48	$1,26 \times 10^8$	0,82	$1,24 \times 10^8$	0,82
EVL2		$6,88 \times 10^{-8}$	$1,40 \times 10^8$	0,42	$1,41 \times 10^8$	0,37	$1,40 \times 10^8$	0,37
EVL3		$6,93 \times 10^{-8}$	$1,28 \times 10^8$	27,95	$2,36 \times 10^8$	32,33	$1,29 \times 10^8$	27,81
EVL4		$6,95 \times 10^{-8}$	$1,36 \times 10^8$	1,00	$1,37 \times 10^8$	0,73	$1,39 \times 10^8$	0,73

Tabela 7.5: Frequência média entre o valor máximo da parte imaginária e o valor máximo da magnitude.

	Val. máx. da parte imaginária [Hz]	Magnitude máxima [Hz]	$f_{\text{méd}}$ [Hz]
EVL1	478,0056	474,989	476,0523
EVL2	490,9897	489,1852	490,0875
EVL3	687,6053	507,8727	597,739
EVL4	512,8998	516,6588	514,7793

Tabela 7.6: Valores de módulo de elasticidade de cada provete obtidos recorrendo à média dos valores das frequências naturais de vibração da magnitude e da componente imaginária da função transferência.

Referência	$(\beta l)^2$ [m ²]	$2\pi f$ [rad.s ⁻¹]	$\rho(\text{Al})^4$ [kg.m ³]	I [m ⁴]	E [Pa]
EVL1	22,37	2991,363	$4,83 \times 10^{-4}$	$6,92 \times 10^{-8}$	$1,25 \times 10^8$
EVL2		3079,194	$5,12 \times 10^{-4}$	$6,88 \times 10^{-8}$	$1,41 \times 10^8$
EVL3		3755,941	$4,38 \times 10^{-4}$	$6,93 \times 10^{-8}$	$1,78 \times 10^8$
EVL4		3234,583	$4,58 \times 10^{-4}$	$6,95 \times 10^{-8}$	$1,38 \times 10^8$

Tabela 7.7: Valores médios do módulo de elasticidade (E), coeficiente de amortecimento (η), volume relativo de resina (V_{resina}) e densidade (ρ) obtidos do ensaio de vibração livre.

Referência	E [MPa]	Factor de perda (η) []	V_{resina} (%)	ρ [kg/m ³]
EVL1	125	4,3437	19,5	331
EVL2	141	4,8335	21,5	352
EVL3	178	3,8643	16,7	301
EVL4	138	4,7924	17,9	313

Tabela 7.8: Valores médios do módulo de elasticidade, fracção volúmica de cortiça e densidade dos provetes para os dois ensaios realizados.

	Ensaio de compressão axial	Ensaio de vibração
$E_{\text{médio}}$ [MPa]	91,38	145,5
$V_{\text{cortiça}}$ [%]	80,2	81,1
ρ [kg/m ³]	314,94	324,3

de elasticidade E , se verificariam valores mais baixos do factor de amortecimento (η), que por sua vez implicariam uma menor fracção volúmica de cortiça ($V_{\text{cortiça}}$) no provete. Pelos resultados obtidos, não é possível estabelecer uma relação coerente entre as variações de E , η e $V_{\text{cortiça}}$.

7.5 Conclusões

Pelos procedimentos efectuados e avaliando os resultados obtidos com os diferentes métodos de medição adoptados, pode concluir-se que a obtenção do módulo de elasticidade a partir de ensaios de compressão está sujeita a elevada sensibilidade e, conseqüentemente, a desvios ou mesmo a erros, devidos essencialmente à dificuldade em definir de forma exacta a região elástica da curva tensão-deformação. Por outro lado, no caso dos ensaios de vibração livre, as condições necessárias ao processo são algo exigentes, tornando-se complicadas de executar na prática. Pode afirmar-se que este processo implica uma aquisição mais sensível e delicada dos dados provenientes dos ensaios. No entanto, tal como foi referido no capítulo referente à discussão dos resultados, os valores obtidos nos dois ensaios são bastante próximos e da mesma ordem de grandeza. Assim, pode-se afirmar que qualquer um dos métodos usados se torna minimamente fiável para obtenção do módulo de elasticidade de materiais compósitos e outros.

Parte III

MODELAÇÃO CONSTITUTIVA E NUMÉRICA

Capítulo 8

Modelação constitutiva

De uma forma genérica, um modelo constitutivo é um modelo mecânico-matemático que descreve o comportamento de um determinado material. Esta descrição pode ser feita, por exemplo, em termos da resposta do material em tensão-deformação. Devido à relativa complexidade de comportamento exibida pelo Core-Y, a formulação de um modelo constitutivo suficientemente genérico e abrangente revelou-se uma tarefa com alguma complexidade.

Nos parágrafos seguintes, apresentam-se quatro modelos que se pretende sejam representativos do comportamento do Core-Y. Estes modelos constitutivos devem representar a resposta do Core-Y em compressão uniaxial. Deve referir-se que todos os modelos desenvolvidos no âmbito deste trabalho e aqui propostos têm por base o comportamento médio (resultados médios) em compressão, obtido e descrito anteriormente.

8.1 Modelos constitutivos propostos

No primeiro modelo, faz-se a aproximação do comportamento do Core-Y recorrendo a um conjunto de três funções lineares, correspondentes a cada regime da curva de comportamento global do material compósito. Este modelo, designado por modelo tri-linear (3L), pode assim ser apresentado recorrendo a uma equação genérica do tipo

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon + \sigma_0 & \varepsilon < \varepsilon_p \\ A_1\varepsilon + B_1 & \varepsilon_p < \varepsilon < \varepsilon_d \\ C_1\varepsilon + D_1 & \varepsilon > \varepsilon_d \end{cases}, \quad (8.1)$$

em que ε_p e ε_d são as deformações de início de patamar e de densificação, respectivamente, E e σ_0 são o módulo de elasticidade e a tensão inicial, e A_1 , B_1 , C_1 e D_1 são constantes.

O segundo modelo, aproxima o comportamento global do Core-Y recorrendo a duas funções lineares, correspondentes às regiões elástica e de patamar, e a uma função exponencial, correspondente à região de densificação do material. Este modelo, designado por modelo bi-linear-exponencial (2LE), pode assim ser descrito por uma relação matemática do tipo

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon + \sigma_0 & \varepsilon < \varepsilon_p \\ A_2\varepsilon + B_2 & \varepsilon_p < \varepsilon < \varepsilon_d^* \\ C_2 \exp\left(\frac{-\varepsilon}{t_2}\right) + D_2 & \varepsilon > \varepsilon_d^* \end{cases}, \quad (8.2)$$

em que ε_p e ε_d^* são as deformações de início de patamar e de densificação, respectivamente, E e σ_0 são o módulo de elasticidade e a tensão inicial, e A_2 , B_2 , C_2 , D_2 e t_2 são constantes.

O terceiro modelo, à semelhança do anterior, aproxima o comportamento do Core-Y a duas funções lineares, correspondentes às regiões elástica e de patamar, e a uma função de potência, que corresponde à região de densificação. Este modelo, designado por modelo bi-linear-potencial (2LP), pode assim ser descrito pela relação matemática genérica

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon + \sigma_0 & \varepsilon < \varepsilon_p \\ A_3\varepsilon + B_3 & \varepsilon_p < \varepsilon < \varepsilon_d \\ C_3\varepsilon^{(n_3)} & \varepsilon > \varepsilon_d \end{cases} \quad (8.3)$$

em que ε_p e ε_d são as deformações de início de patamar e de densificação, respectivamente, E e σ_0 são o módulo de elasticidade e a tensão inicial, e A_3 , B_3 , C_3 e n_3 são constantes.

Por sua vez, o quarto modelo, aproxima o comportamento do Core-Y recorrendo a uma função linear, que compreende à região de comportamento linear-elástico, e a uma função exponencial, com a qual se pretende representar simultaneamente as regiões de patamar e de densificação. Este modelo, designado por modelo linear-exponencial (LE), pode assim ser descrito pela seguinte equação matemática:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon + \sigma_0 & \varepsilon < \varepsilon_p \\ A_4 \exp\left(\frac{-\varepsilon}{t_4}\right) + B_4 & \varepsilon > \varepsilon_p \end{cases} \quad (8.4)$$

em que ε_p e ε_d são as deformações de início de patamar e de densificação, respectivamente, E e σ_0 são o módulo de elasticidade e a tensão inicial, e A_4 , B_4 e t_4 são constantes.

No âmbito deste estudo, colocou-se ainda a hipótese de estudar um quinto modelo, que aproximava o comportamento do Core-Y a uma função linear, correspondente à região elástica, e a outra potencial, que compreendia a região de patamar. No entanto, depois de alguns estudo preliminares, verificou-se que esta proposta se afastava demasiado do comportamento médio do Core-Y, pelo que foi excluída deste estudo.

Todo o tratamento matemático das equações analíticas apresentadas para os modelos constitutivos foi levado a cabo recorrendo à folha de cálculo OriginLab.

O primeiro ramo das equações 8.1 a 8.4 define o regime de comportamento linear-elástico do material e é comum a todos os modelos. Como foi referido, a constante E corresponde ao módulo de elasticidade do Core-Y, tendo sido considerado o valor obtido a partir da curva média de comportamento, isto é, $E = 91,39$ MPa. A tensão inicial, definida pelo parâmetro σ_0 , surge pela existência do intervalo inicial não nulo, descrito anteriormente, que, por esse motivo, não pode ser ignorado. Deste modo, o parâmetro σ_0 corresponde à ordenada na origem do ramo referenciado e que melhor aproxima a região elástica. Para determinar este parâmetro incluiu-se na equação $\sigma = E\varepsilon + \sigma_0$ um ponto experimental pertencente à região elástica, isto é,

$$P_{RP} \sim (0,020; 1,220) \quad \varepsilon\sigma = E\varepsilon + \sigma_0$$

Substituindo,

$$1,220 = 91,39 \times 0,020 + \sigma_0 \Rightarrow \sigma_0 \approx -0,61$$

Sendo assim, o ramo correspondente ao regime elástico comum aos quatro modelos propostos é dado pela equação

$$\sigma = 91,39\varepsilon - 0,61. \quad (8.5)$$

Os restantes coeficientes numéricos A_i , B_i , C_i e D_i , assim como os parâmetros t_i e n_i , foram calculados a partir de pontos conhecidos de cada ramo a que pertencem. Consideram-se para

tal os pontos de desdobramento dos ramos, de modo a garantir a continuidade entre os mesmos. Os ramos de funções exponenciais necessitam de um ponto adicional para a determinação do parâmetro t , tendo-se optado por considerar um ponto experimental adicional.

O ponto P_1 , naturalmente comum a todos os modelos desenvolvidos, diz respeito à transição entre a região elástica e a região de patamar, tendo sido determinado pela intersecção da recta inicial elástica com a da tensão de patamar. Os pontos P_2^* e P_2 , pertencentes aos Modelos 2LE e 2LP, respectivamente, foram determinados intersectando a recta final de densificação com a da tensão de patamar, e corresponde à transição entre a região de patamar e de densificação. O ponto P_3 define o final da região de patamar da curva de comportamento médio e o P_4 foi o ponto adicional escolhido para auxiliar o cálculo do terceiro coeficiente numérico que surge nos Modelos 2LE e LE. O ponto P_5 é o último ponto da curva de comportamento médio. Na Tabela 8.1 apresentam-se as coordenadas dos pontos utilizados para determinação dos coeficientes numéricos e parâmetros de cada modelo constitutivo proposto.

Tabela 8.1: Pontos auxiliares para determinação dos coeficientes numéricos e parâmetros dos modelos constitutivos propostos.

Referência	Coordenadas	
P_1	$(\varepsilon_p; \sigma(\varepsilon_p))$	(0,038; 2,866)
P_2^*	$(\varepsilon_{d^*}; \sigma(\varepsilon_{d^*}))$	(0,757; 3,100)
P_2	$(\varepsilon_d; \sigma(\varepsilon_d))$	(0,410; 3,0148)
P_3	$(\varepsilon_i; \sigma(\varepsilon_i))$	(0,700; 8,908)
P_4	$(\varepsilon_f; \sigma(\varepsilon_f))$	(0,816; 34,695)

A determinação dos coeficientes numéricos C_2 , D_2 e do parâmetro t_2 do Modelo 2LE, bem como dos coeficientes numéricos A_4 , B_4 e do parâmetro t_4 do Modelo LE, seguiu a metodologia genérica que a seguir se apresenta. O objectivo de tal metodologia foi simplificar a equação exponencial inicial, de três incógnitas, a uma equação linear, de 2 incógnitas.

$$\sigma = H \exp\left(-\frac{\varepsilon}{t}\right) + \sigma_0 \quad (8.6)$$

Assumindo que $\sigma - \sigma_0 = \sigma^*$, pode determinar-se que

$$\begin{aligned} \sigma^* &= H \exp\left(-\frac{\varepsilon}{t}\right) \\ \Leftrightarrow -\ln(\sigma^*) + \ln(H) &= \frac{\varepsilon}{t} \\ \Leftrightarrow t \times \ln(H) - t \times \ln(\sigma^*) &= \varepsilon \end{aligned} \quad (8.7)$$

Assumindo que $t \times \ln(H) = Z$, obtém-se

$$Z - t \times \ln(\sigma^*) = \varepsilon \quad (8.8)$$

A Tabela 8.2 apresenta informação auxiliar para determinação dos parâmetros da equação-8.8

Uma vez que a equação 8.8 apresenta duas incógnitas, torna-se suficiente que nela seja aplicada a informação constante da Tabela 8.2, relativa aos pontos P_3 P_4 , para a determinação de Z e t .

Tabela 8.2: Tabela auxiliar para determinação dos parâmetros da equação-8.8

		σ	σ^*	ε	$\ln(\sigma^*)$
Modelo 2	P_2	3,0148	0,0000	0,4100	-
	P_3	8,9076	5,8928	0,7000	1,7737
	P_4	34,6946	31,6798	0,8162	3,4557
Modelo 4	P_1	2,86634	0,0000	0,0380	-
	P_3	8,90760	6,04126	0,7000	1,7986
	P_4	34,69460	31,8283	0,8126	3,4604

$$\begin{cases} 0,7000 = Z - 1,7737 \times t \Rightarrow Z = 0,5774 \\ 0,8162 = Z - 3,4557 \times t \Rightarrow t = -0,069084 \end{cases}$$

Seguindo o raciocínio anterior, para os valores de P_3 P_4 do Modelo LE:

$$\begin{cases} 0,7000 = Z - 1,79861 \times t \Rightarrow Z = 0,5742 \\ 0,8162 = Z - 3,46035 \times t \Rightarrow t = -0,0699267 \end{cases}$$

O parâmetro H é então determinado pela seguinte relação:

$$Z = t \times \ln(A) \Leftrightarrow \exp\left(\frac{Z}{t}\right) = H$$

A Tabela 8.3 resume os coeficientes numéricos e parâmetros da equação 8.6 dos Modelos 2LE e LE.

Tabela 8.3: Coeficientes numéricos e parâmetros dos Modelos 2LE e LE

	Z	H	t	σ_0
Modelo 2	0,5774	$2,3432 \times 10^{-4}$	$6,9084 \times 10^{-2}$	3,0148
Modelo 4	0,5742	$2,7141 \times 10^{-4}$	$6,9928 \times 10^{-2}$	2,8663

Na Tabela 8.4 apresentam-se os coeficiente numéricos e parâmetros dos cinco modelos constitutivos propostos.

Tabela 8.4: Coeficientes numéricos e parâmetros dos modelos constitutivos propostos

	Modelo 3L	Modelo 2LE	Modelo 2LP	Modelo LE
A	0,32	0,40	0,399	$2,71 \times 10^{-4}$
B	2,85	2,85	2,85	2,87
C	533,69	$2,34 \times 10^{-4}$	71,32	-
D	-400,91	3,01	-	-
t	-	$6,91 \times 10^{-2}$	-	$6,99 \times 10^{-2}$
n	-	-	3.55	-

A representação gráfica dos cinco modelos constitutivos propostos encontra-se nos gráficos das Figuras 8.1.

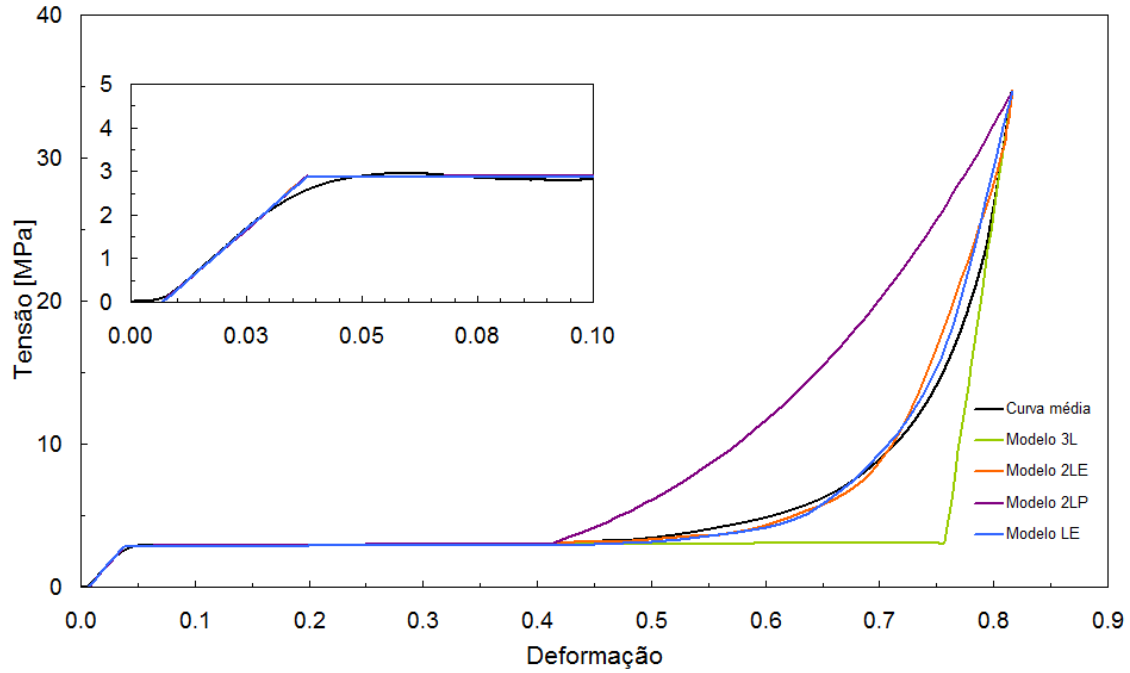


Figura 8.1: Gráfico comparativo dos modelos constitutivos propostos com a curva média experimental com pormenor da região elástica.

8.2 Validação numérica dos modelos constitutivos

Com base nos quatro modelos constitutivos propostos realizou-se um estudo numérico cujo objectivo era concluir sobre o modelo mais adequado para descrever o comportamento do Core-Y. Desenvolveu-se também um estudo numérico com base nos resultados dos ensaios de compressão.

A implementação e a configuração dos ensaios foram realizadas no programa de pré- e pós-processamento Abaqus/Explicit com recurso ao método de *mass scaling*.

Nos ensaios numéricos assumiram-se as mesmas dimensões e configuração que os ensaios experimentais, utilizando-se um provete cilíndrico de Core-Y com diâmetro igual à altura ($d = h = 40$ mm). Na Figura 8.2 apresenta-se, de forma esquemática, a configuração dos ensaios. O provete cilíndrico de Core-Y tem a face superior apoiada numa parede rígida móvel, que comprime a face superior. A face inferior do tubo encontra-se em contacto com uma parede rígida fixa. Para reduzir o tempo de cálculo e evitar movimentos de corpo rígido, realizaram-se os ensaios recorrendo a dois planos de simetria.

Uma vez que o Core-Y não demonstrou ter sensibilidade à velocidade de deformação, para a gama de velocidades e temperaturas ensaiadas, os ensaios foram realizados a 200 mm/min. Assim, em função da velocidade de ensaio e do deslocamento máximo considerado ($d_{\max} = 32$ mm), atribuiu-se um tempo total de 10,2 s.

Relativamente ao tipo de elementos finitos adoptados, optou-se por sólidos hexaédricos de oito nós (C3D8R), com três graus de liberdade por nó e oito pontos de integração. Na Figura 8.3, pode observar-se uma representação esquemática de um elemento sólido hexaédrico com oito nós. A utilização de um elemento totalmente integrado, como este, aumenta o tempo de cálculo numérico mas permite evitar a formação de modos de deformação espúrios (modos

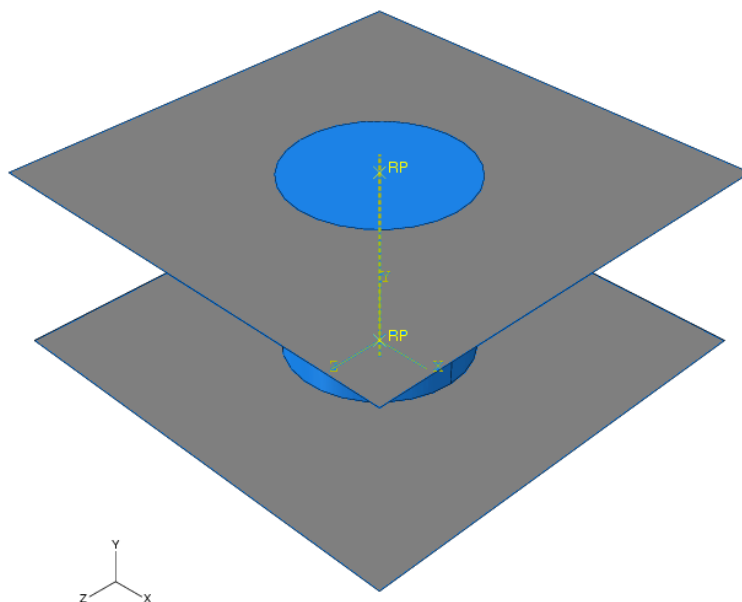


Figura 8.2: Representação esquemática da configuração dos ensaios numéricos realizados para validação numérica dos modelos constitutivos.

de deformação do tipo *hourglass*), levando a maior confiança nos resultados obtidos.

Os elementos sólidos do tipo hexaédrico são os que permitem resultados mais fiáveis em problemas que envolvem cargas, condições fronteira e materiais com propriedades mecânicas de definição complexa, ainda que à custa de mecanismos de geração de malhas mais elaborados. A utilização de elementos hexaédricos para uma correcta modelação de problemas com geometrias complexas exige, frequentemente, o recurso à utilização de elementos finitos altamente distorcidos para se conseguir uma discretização do domínio contínuo a estudar. Neste contexto, torna-se necessária a utilização de formulações isoparamétricas tridimensionais para a análise por elementos finitos [61].

Dentro do grupo dos elementos finitos sólidos é possível variar o número de nós, podendo-se considerar elementos hexaédricos de baixa ordem (com oito nós), que exigem funções de interpolação de primeiro grau. É também possível construir elementos finitos hexaédricos com funções de forma de grau superior, como o elemento finito de segunda ordem lagrangiano (com 27 nós) e o elemento finito serendipítico (com 20 nós). Na Figura 8.3 são apresentados os elementos referidos [61].

No caso do Core-Y, a estratégia adoptada consistiu em utilizar um modelo de material genérico e simples, capaz de fornecer soluções numéricas estáveis e eficientes para valores elevados de deslocamento e deformação. No entanto, subsistiram algumas dúvidas na escolha do modelo de comportamento a adoptar, uma vez que este não se encaixava perfeitamente em nenhum dos modelos disponibilizados pelo *software* utilizado.

Encontra-se implementado no programa Abaqus um vasto leque de modelos de comportamento para diversos tipos de materiais, desde os celulares aos do tipo espuma. No entanto, muitos deles apresentam o inconveniente de serem dedicados a aplicações específicas ou de serem incompressíveis.

O modelo elastoplástico permite a introdução de uma curva de compressão (experimental

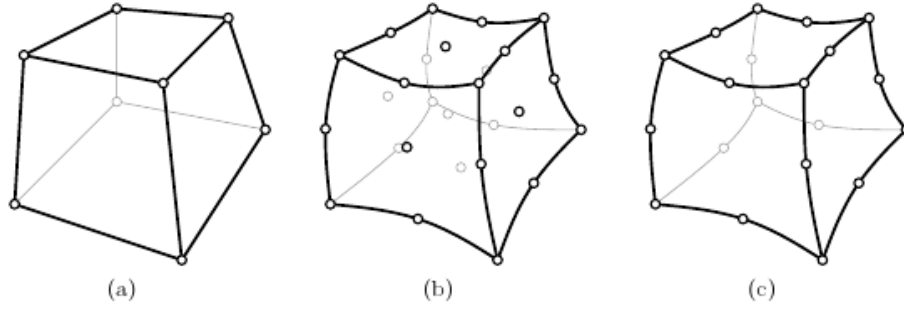


Figura 8.3: Representação esquemática de elementos finitos tridimensionais de diversas ordens: (a) hexaedro de primeira ordem, (b) hexaedro lagrangiano de segunda ordem e (c) hexaedro serendipítico de segunda ordem (imagem reproduzida com autorização dos autores [61]).

ou não) e é capaz de capturar o comportamento de um material celular genérico confinado num tubo e impactado uniaxialmente, como especificado no trabalho publicado por Hanssen *et al.* [62].

De uma forma genérica, um material elastoplástico caracteriza-se por sofrer deformações de natureza irreversível (plasticidade), a partir de um determinado nível de tensão aplicada. Assim, o seu comportamento é elástico até ao limite elástico, a que corresponde a tensão limite de elasticidade σ_y , após a qual o material apresenta deformação plástica. No caso da tensão limite de elasticidade aumentar com a deformação plástica, diz-se que o material sofre encruamento [61].

Os parâmetros de entrada introduzidos no modelo são os seguintes: (i) a massa volúmica do Core-Y (em kg/m^3), (ii) o seu módulo de elasticidade (em Pa), (iii) o coeficiente de Poisson e (iv) a curva do compósito solicitada em compressão no regime plástico, em termos de tensão (em Pa) e deformação.

Na secção anterior referiu-se que a região inicial elástica dos quatro modelos constitutivos propostos é definida pela mesma equação analítica (equação 8.5). Deste modo, os parâmetros elásticos do material são iguais em todos os modelos, variando apenas os parâmetros plásticos dos mesmos. Para a caracterização do regime plástico de cada modelo do Core-Y, introduziu-se a curva de comportamento do material em regime plástico de cada um deles, retirados do gráfico da Figura 8.1, para $\varepsilon > \varepsilon_d$. Relativamente aos ensaios de base experimental, introduziu-se a curva média retirada do gráfico da Figura 6.9 para $\varepsilon > 3,8$.

É de extrema importância a definição da forma como cada componente envolvido na simulação interage quando em contacto com outros componentes. Para tal, existem variados modelos de contacto disponíveis na biblioteca do programa Abaqus. No caso em estudo neste trabalho, é imediata a identificação de alguns dos componentes que interagem entre si: as paredes (móvel e fixa) com as extremidades do tubo.

O tipo de contacto adoptado foi o *general-contact* (sem atrito), que assume, por defeito, todos os pares em interacção no modelo. Este tipo de contacto é somente possível em ambiente Abaqus/Explicit.

Uma das paredes em contacto com os provetes permanece fixa enquanto a outra se encontra móvel e impacta a estrutura à velocidade de ensaio já referida. Uma vez que se trata de uma formulação explícita, foi necessário associar uma determinada massa à parede móvel.

Finalmente, de forma a tornar o sistema numericamente estável, restringiram-se as trans-

lações dos nós da base e do topo do tubo nas direcções transversais ao movimento, de forma a evitar padrões de deformação não-realistas. As rotações desses nós foram permitidas uma vez que, fisicamente, as extremidades dos tubos podem ser consideradas como apoios fixos. Criou-se um ponto de referência para cada placa: o da placa fixa foi encastrado, enquanto que o da placa móvel impedia as translações transversais ao movimento e todas as rotações, garantido deste modo um deslocamento vertical da placa móvel.

Optou-se por uma malha de elementos finitos com elementos de dimensão característica de 2 mm para o tubo do material compósito. O cuidado na escolha do tamanho de elemento teve a ver com a necessidade de garantir que não houvesse distorção (excessiva) dos elementos.

8.3 Resultados e discussão do estudo de validação numérica dos modelos constitutivos

Comparando o Modelo 3L com os resultados experimentais, verifica-se que representa correctamente a curva de comportamento na região inicial de comportamento linear. Porém, não caracteriza de forma satisfatória nem a região de patamar nem a de densificação. Esta limitação era previsível uma vez que este modelo de comportamento se baseia numa aproximação por funções lineares, não permitindo uma boa aproximação à curva de comportamento média. À semelhança do Modelo 3L, os Modelos 2LE e LE representam correctamente a curva de comportamento da região elástica e verifica-se que as regiões de patamar e de densificação são mais correctamente caracterizadas. O Modelo 2LP representa correctamente a curva de comportamento da região elástica. No entanto, afasta-se muito da região de patamar e de densificação.

Podiam ter sido consideradas outras funções matemáticas, como polinómios de ordem superior ou até mesmo funções de potência. No entanto, e em especial em relação às funções polinomiais de ordem superior, existe uma agravante em termos de exigência computacional. Os cálculos inerentes a uma função polinomial de ordem superior são superiores aos necessários para funções lineares ou até mesmo para funções exponenciais. Apesar de garantirem uma aproximação ideal ao comportamento médio do Core-Y, as exigências computacionais seriam de tal ordem que não compensariam a sua aplicação.

De seguida confrontam-se os resultados numéricos da aplicação da curva de comportamento médio experimental com os obtidos para cada modelo proposto.

O modelo constitutivo que melhor caracteriza o comportamento do Core-Y solicitado em compressão uniaxial foi escolhido através da comparação dos resultados numéricos dos quatro modelos propostos com os da aplicação da curva tensão-deformação experimental média.

No gráfico da Figura 8.4 apresentam-se resultados comparativos entre os ensaios numéricos resultantes da aplicação da curva de comportamento médio experimental e os resultados experimentais. São visíveis diferenças significativas entre os dois resultados, em especial em relação à deformação sofrida no regime de patamar. A explicação poderá estar relacionada com a perda de material verificada nos ensaios experimentais e que, naturalmente, não é prevista nas simulações numéricas. Experimentalmente, a perda de material resulta na diminuição da área de contacto com o prato de esmagamento, o que reduz a força de reacção e prolonga o regime de patamar (esmagamento). Por outro lado, numericamente tal não se verifica. Na verdade, o facto do volume de material se manter constante durante o ensaio numérico leva à redução da fase de esmagamento (regime de patamar), uma vez que a área de contacto aumenta e se verifica um crescimento consequente da força de reacção.

Na realidade, o modelo obtido numericamente é o mais próximo e representativo da realidade, uma vez que, não sendo conhecida a aplicação do material, não se pode garantir que haja sempre a possibilidade da sua fragmentação. Neste sentido, é a partir do modelo numérico que se infere o modelo constitutivo do compósito em estudo, sendo esse o usado para os futuros estudos numéricos.

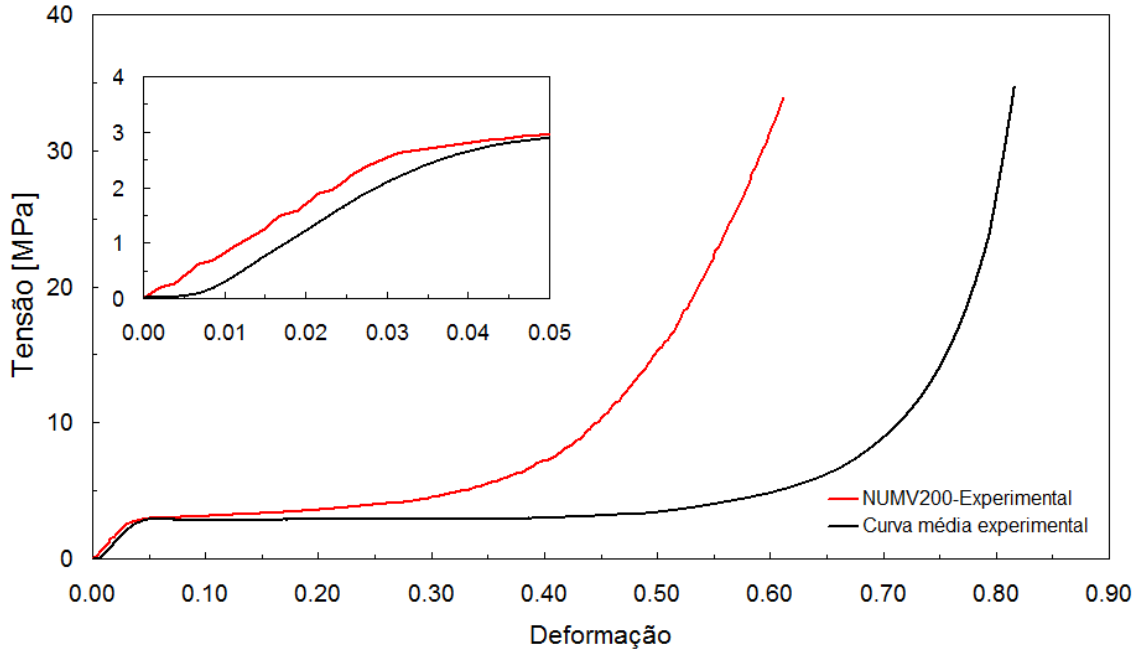


Figura 8.4: Resultados comparativos entre os ensaios numéricos resultantes da aplicação da curva de comportamento médio experimental e os resultados experimentais.

Nos gráficos das Figuras 8.5 apresentam-se comparativamente os resultados dos ensaios numéricos da aplicação dos modelos constitutivos e os dos ensaios numéricos com base na curva média experimental. Os Modelos 2LE e LE são os que melhor se aproximam dos resultados numéricos da curva média experimental e o Modelo 2LP o que mais se afasta.

Uma vez que se toma como referência não o comportamento médio experimental do Core-Y mas sim o resultado numérico da aplicação da curva desse comportamento, o estudo é centrado nos resultados numéricos dos modelos constitutivos mais próximos dos baseados na curva experimental (Modelos 2LE e LE). Não se verificou uma diferença gráfica significativa entre os Modelos 2LE e LE, tornando-se necessário avaliar e comparar os ensaios quanto ao tempo de cálculo e recursos computacionais exigidos pelas equações analíticas de cada modelo.

Uma vez que todas as simulações levadas a cabo neste estudo de validação numérica recorrem a malhas de elementos finitos com o mesmo número de elementos, nós e graus de liberdade, o único parâmetro que poderá diferenciá-los é o tempo de processamento, que está relacionado com a exigência computacional de cada modelo.

A informação introduzida no *software* de simulação relativa ao comportamento do material foi igual em todos os ensaios, encontrando-se sob a forma de pontos tensão-deformação. Neste sentido, as exigências computacionais dos Modelos 2LE e LE não são passíveis de comparação.

Tanto o Modelo 2LE quanto o Modelo LE apresentam-se sob a forma de função por ramos. No entanto, o primeiro possui três ramos que englobam duas equações polinomiais de primeira

ordem e uma equação exponencial, enquanto o segundo apresenta apenas dois ramos que englobam uma função polinomial de primeira ordem e uma equação exponencial.

Pondo a hipótese de se recorrer a uma subrotina de programação para modelar o comportamento do Core-Y, à partida o Modelo 2LE exigirá menos recursos que o Modelo LE, uma vez que a função exponencial (matematicamente mais complexa) é aplicada a um intervalo de deformação mais pequeno (região de densificação). Pelo exposto, o Modelo 2LE será o eleito para representar o comportamento em compressão do material em estudo.

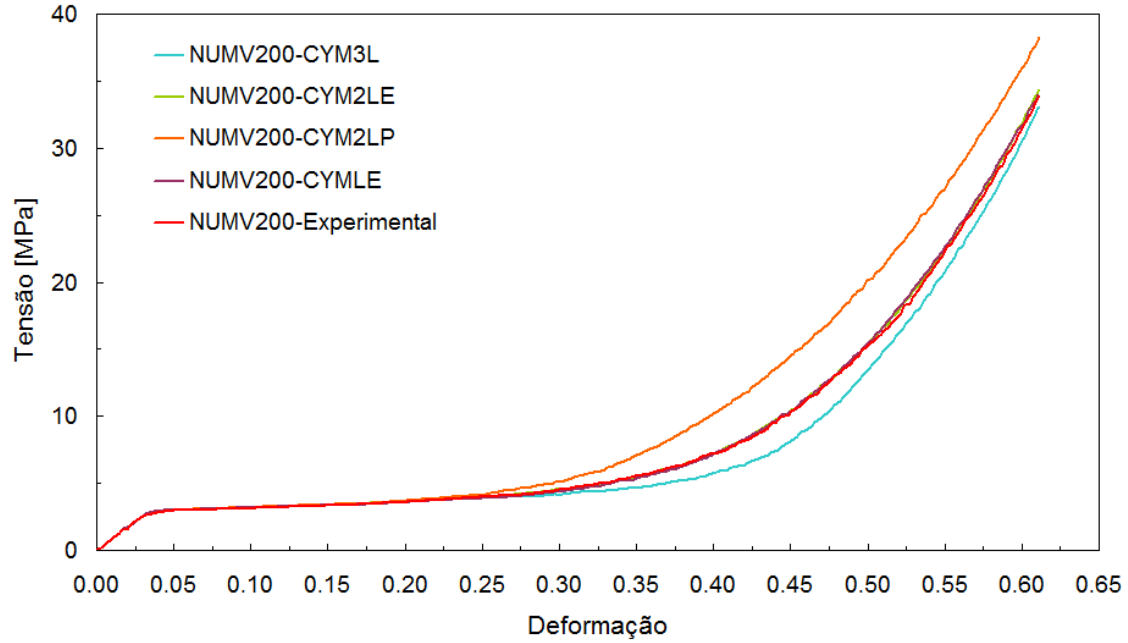


Figura 8.5: Comparação dos resultados dos ensaios numéricos da aplicação dos modelos constitutivos e os dos ensaios numéricos com base na curva média experimental.

Capítulo 9

Análise *quasi*-estática

O programa de análise pelo método dos elementos finitos Abaqus abrange três produtos principais: o Abaqus/CAE, o Abaqus/Standard e o Abaqus/Explicit, que abordam diferentes capacidades especializadas.

O Abaqus/CAE oferece uma ampla possibilidade de modelação assim como um ambiente de visualização dos produtos de análise. Permite o acesso directo aos modelos CAD, à malha e à visualização avançada, tornando-se um ambiente de modelação preferencial para muitos utilizadores.

Por outro lado, o Abaqus/Standard fornece a tecnologia para resolver a análise implícita de elementos finitos, nomeadamente estática, dinâmica de velocidade baixa e térmica. Esta análise vem equipada com a mais ampla gama de contacto e as opções de material não-linear.

Pela sua capacidade para lidar de maneira eficiente com diversos comportamentos não-lineares, o Abaqus/Explicit é um produto de análise de elementos finitos particularmente útil para simular eventos *quasi*-estáticos e dinâmicos, como testes de queda, impactos automóvel e balístico, entre outros, com predominância para a resposta não-linear e de alta velocidade. O Abaqus/Explicit é compatível com o ambiente de modelagem Abaqus/CAE, atendendo a todas as necessidades de pré e pós-processamento.

O método explícito tem por base um intervalo de tempo geralmente demasiado pequeno para se manter a estabilidade numérica, tornando-se pouco indicado para a análise de rotina. Para aumentar o intervalo de tempo em cada ciclo, reduzir o custo de CPU e melhorar o desempenho, usa-se frequentemente o *mass scaling*.

O *mass scaling* é uma técnica de análise dinâmica em que uma determinada massa é adicionada a uma estrutura com o objectivo de alcançar uma maior iteração explícita. O efeito alcançado pode ser insignificante, e nesses casos essa adição é justificável.

No caso do estudo apresentado neste capítulo, em que se simula a compressão *quasi*-estática (baixa velocidade) de estruturas tubulares, recorreu-se a essa técnica de análise dinâmica em ambiente Abaqus/Explicit. Para tal, às paredes responsáveis pela compressão adicionou-se uma massa $m = 10$ kg.

A aplicação inadequada desta técnica pode causar problemas graves de penetração e aumentar significativamente o efeito dinâmico, inviabilizando os resultados. Nestes casos, é necessário calibrar o efeito de *mass scaling*, ajustando os parâmetros específicos do *software*. No final do ensaio é necessário avaliar criteriosamente os níveis de energia interna e de dissipação viscosa do sistema.

Capítulo 10

Procedimento e métodos

Neste capítulo, pretende-se explorar a capacidade do compósito Core-Y actuar como material de absorção de energia de impacto. Para o efeito, estudou-se numericamente o comportamento em compressão axial *quasi*-estática de estruturas tubulares de Alumínio preenchidas com Core-Y e realizaram-se ensaios numéricos com o programa Abaqus com as estruturas referidas.

Para analisar a eficácia e a viabilidade da utilização do Core-Y como material de absorção de impacto, é primeiramente necessário averiguar se apresenta vantagens significativas em relação aos já existentes e utilizados para o fim indicado. O presente trabalho foi desenvolvido em condições idênticas às de um outro, de cariz experimental, anteriormente realizado por M. Paulino, tomado como referência. Este estudo experimental incidiu sobre o comportamento mecânico de estruturas tubulares de Alumínio 6060-T5 ocas e preenchidas com esferas de espuma de Alumínio APM (Advanced Pore Morphology) de diâmetro médio 7 mm.

10.1 Configuração dos ensaios numéricos

Na configuração das simulações, utilizou-se um tubo cilíndrico de Alumínio 6060-T5 com espessura $e = 1,5$ mm, altura $h = 73$ mm e diâmetro exterior $d = 50$ mm. Utilizou-se ainda um provete cilíndrico de Core-Y, com diâmetro $d_i = 47$ mm e a mesma altura h . Este foi confinado ao de Alumínio e apresentam ambos a face superior apoiada numa parede rígida móvel, que embate na face superior destas estruturas, como representado esquematicamente na Figura 10.1. A face inferior das estruturas encontra-se em contacto com uma parede rígida fixa.

Em todos os ensaios, atribuiu-se à parede móvel uma velocidade fixa. Em função desta e do deslocamento máximo considerado ($l_{\max} = 60$ mm) atribuiu-se um tempo total diferente para cada ensaio, apresentado na Tabela 10.1.

Tabela 10.1: Tempos de ensaio considerados para as diferentes velocidades de ensaio.

v_{ensaio} [mm/min]	Deslocamento [mm]	t_{ensaio} [s]
2		1800
20	60	180
200		18

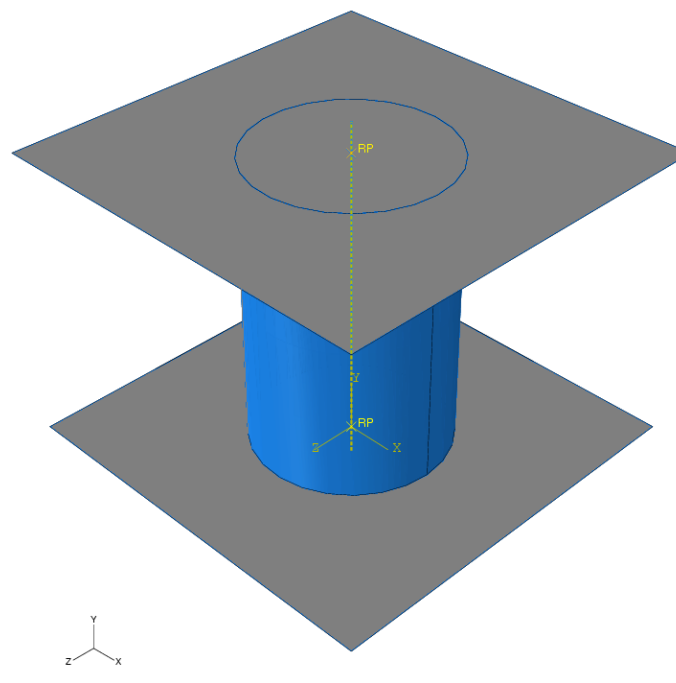


Figura 10.1: Representação esquemática da configuração dos ensaios numéricos realizados.

10.2 Parâmetros do modelo

A implementação e a configuração dos ensaios de simulação numérica foram realizadas no programa de pré- e pós-processamento Abaqus. Para garantir, com confiança, a compatibilidade entre os resultados numéricos e a realidade física, a definição e a implementação do modelo foram estudadas com rigor. Foi importante escolher acertadamente parâmetros, como o tipo de geometria da estrutura, o tipo e dimensão dos elementos finitos, o tipo de discretização, os modelos de comportamento dos materiais, os tipos de contacto e as condições de fronteira.

10.2.1 Geometria das estruturas e tipo de elementos

A geometria das estruturas simuladas foi modelada directamente no programa Abaqus/Explicit com recurso ao método de *mass scaling*. Em relação ao tubo cilíndrico de Alumínio, uma vez que consiste numa estrutura de parede fina e com elevada taxa de deformação, optou-se por elementos bidimensionais do tipo casca. Consequentemente, o modelo geométrico do tubo de Alumínio consiste unicamente na superfície média do tubo. Na sua modelação numérica, os elementos finitos seleccionados para discretização da estrutura de espessura $t = 1,5$ mm foram elementos casca S4R de 4 nós e 7 pontos de integração.

Estruturas do tipo casca são aquelas em que uma das dimensões (espessura) é substancialmente inferior às restantes, e que apresentam ainda curvatura (ao contrário das estruturas do tipo placa). As características geométricas particulares dessas estruturas conduzem a um comportamento estrutural distinto do reproduzido através das formulações tridimensionais. Consequentemente, torna-se necessário recorrer a elementos finitos particulares específicos para a análise deste tipo de estruturas, de entre os quais se destacam os elementos finitos degenerados de sólidos tridimensionais [61].

Elementos finitos do tipo casca (ou placa) devem ser utilizados em problemas em que a variação dos deslocamentos (ou da deformação) ao longo da espessura não é desprezável, não se podendo recorrer aos elementos bidimensionais. Tal acontece sempre que existam cargas normais ao plano da placa, como é o caso, por exemplo, das solicitações de flexão associadas a geometrias com espessura reduzida.

O elemento casca S4R, usado nas simulações, foi o Belytschko e Tsay com 4 nós [6], um elemento finito isoparamétrico interpolado bilinearmente que utiliza a ordem mais baixa de funções de interpolação disponíveis. Este elemento encontra-se sub-integrado no plano, pois tem um único ponto de integração no centro do elemento. No entanto, para tratar problemas de flexão elasto-plástica, o utilizador pode necessitar de definir diferentes quantidades de pontos de integração ao longo da espessura de elemento. Em termos computacionais, é bastante eficiente utilizar uma formulação subintegrada. Com efeito, na maioria dos casos, é mais fácil tratar computacionalmente quatro elementos subintegrados do que um único totalmente integrado, com quatro pontos de integração. A utilização de funções de interpolação de baixa ordem e de um único ponto de integração no plano são as principais razões da grande eficiência computacional do elemento casca de Belytschko e Tsay. Porém, a desvantagem deste elemento subintegrado prende-se com a existência, no elemento, de modos *hourglass* (modos de energia nula).

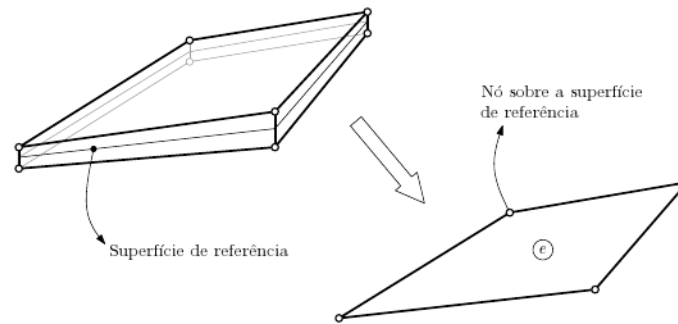


Figura 10.2: Conceito de degeneração de um sólido tridimensional num elemento finito de superfície (imagem reproduzida com autorização dos autores [61]).

Uma vez que a avaliação da matriz deformação-deslocamento do elemento é simplificada, certos modos de deformação resultam no cálculo de deformações nulas, não sendo calculadas nem tensões nem forças nodais. Isto significa que as velocidades dos nós podem facilmente tender para infinito, desde que permaneçam paralelas aos modos de deformação *hourglass*. A instabilidade devida ao fenómeno de *hourglass* é a maior desvantagem do elemento casca de Belytschko e Tsay (ou de qualquer outro elemento subintegrado). Essa instabilidade pode ser prevenida utilizando-se algumas técnicas, descritas, por exemplo, por Gameiro *et al.* [6]. Essas técnicas consistem em detectar a presença do modo *hourglass* no padrão de deformação do elemento e, seguidamente, aplicar um campo de forças externas para garantir que os valores correspondentes das velocidades e/ou deslocamentos fiquem abaixo de um valor limite. No programa Abaqus, o elemento do tipo S4R já tem em consideração este tipo de fenómeno, não sendo necessário controlar as instabilidades resultantes.

Para o provete cilíndrico de compósito Core-Y, utilizaram-se elementos sólidos hexaédricos C3D8R, já referidos na secção de validação numérica dos modelos constitutivos propostos.

10.2.2 Modelos de material

O sucesso de programas de simulação numérica pelo método dos elementos finitos para a análise de estruturas e componentes relaciona-se directamente com a precisão e eficiência dos modelos de material utilizados. Infelizmente, os modelos de material raramente são capazes de reproduzir de forma precisa o comportamento mecânico de um determinado material para todos os tipos de carregamento. Adicionalmente, os modelos de material implementados no programa Abaqus são, geralmente, “caixas negras”, sendo apenas possível actuar sobre os parâmetros de entrada requeridos e acedendo a uma descrição limitada dos modelos, sem informação detalhada sobre a forma como estes são programados e implementados. Perante estes factos, torna-se imperativo determinar prioridades e estratégias para a escolha de um modelo aplicável a um material sujeito a determinada configuração de carregamento, sendo certo que nenhum dos seleccionados se irá adequar perfeitamente ao seu comportamento mecânico.

Para o compósito, o modelo adoptado foi o descrito na secção de validação dos modelos constitutivos com base no Modelo 2.

Em relação ao Alumínio, considerou-se o mesmo modelo de comportamento adoptado para o Core-Y (modelo elastoplástico), por ser o mais adequado a materiais metálicos. Foram também definidos os mesmos parâmetros de entrada usados no compósito, nomeadamente: a massa volúmica, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a curva tensão-deformação.

10.2.3 Definição de contactos e condições de fronteira

No caso em estudo, é imediata a identificação de alguns dos componentes que interagem entre si: por um lado a parede exterior do tubo de Core-Y com a parede interior do tubo de Alumínio, por outro as paredes (móvel e fixa) com as extremidades dos dois tubos. É importante não esquecer que a própria parede exterior do tubo de Alumínio poderá entrar em contacto com ela própria.

O tipo de contacto adoptado foi o *general-contact* (sem atrito), que assume, por defeito, todos os pares em interacção no modelo. Este tipo de contacto é somente possível em ambiente Abaqus/Explicit.

Uma das paredes em contacto com os tubos permanece fixa enquanto a outra se encontra móvel e impacta a estrutura a uma dada velocidade de ensaio. Uma vez que se trata de uma formulação explícita, foi necessário associar uma determinada massa à parede móvel.

Finalmente, de forma a tornar o sistema numericamente estável, restringiram-se as translações dos nós da base e do topo do tubo de Alumínio e do provete de Core-Y nas direcções transversais ao movimento, de forma a evitar padrões de deformação não-realistas. As rotações desses nós foram permitidas uma vez que, fisicamente, as extremidades dos tubos podem ser consideradas como apoios fixos. Criou-se um ponto de referência para cada placa: o ponto da placa fixa foi encastrado, enquanto que o da placa móvel impedia as translações transversais ao movimento e todas as rotações, garantido deste modo um deslocamento vertical da placa móvel.

10.3 Selecção da malha de elementos finitos

Para maximizar o grau de confiança nos resultados numéricos obtidos, procedeu-se à optimização das condições de ensaio. No que diz respeito à caracterização do comportamento dos materiais, e uma vez que o modelo geométrico é simples, o processo consistiu unicamente na

optimização da malha, isto é, na optimização da dimensão dos respectivos elementos finitos. Com este procedimento pretendia-se seleccionar, entre malhas gradualmente refinadas, aquela que permitisse obter resultados mais precisos. Por outras palavras, pretendia-se seleccionar uma malha de elementos finitos composta por elementos de dimensões reduzidas, mas não demasiado, já que tal resultaria num processo de computação moroso e, conseqüentemente, dispendioso, bem como na possibilidade de maior número de erros, dada a maior quantidade de cálculos necessários à resolução do problema.

Neste sentido, realizaram-se simulações numéricas com a configuração descrita na Secção “Configuração dos ensaios numéricos”. A dimensão dos elementos finitos utilizada foi a indicada na Tabela 10.2. Optou-se por uma designação alfanumérica para distinguir individualmente diferentes estudos de convergência, indicando-se a dimensão dos elementos.

Tabela 10.2: Referências e características dos ensaios numéricos realizados para optimização da malha de elementos finitos.

Referência	l [mm]	Nº de elementos	Nº de nós	DOF
ALCY-M3.0	3,00	1954	2469	8463
ALCY-M2.5	2,50	2696	3364	144594
ALCY-M2.0	2,00	5900	6970	23196
ALCY-M1.5	1,50	12746	14544	47538
ALCY-M1.0	1,00	41447	45310	144594
ALCY-M0.75	0,75	91867	98440	310614
ALCY-M0.5	0,50	319212	334081	1036206

Para análise dos resultados obtidos em cada simulação utilizaram-se, como referência, os resultados da variação da força de reacção da estrutura na placa móvel ao longo do seu deslocamento. O objectivo foi comparar os valores obtidos em cada simulação e averiguar a sua convergência consoante o refinamento da malha. A variação da força de reacção com o deslocamento pode ser visualizada no gráfico da Figura ??.

Para efeitos de comparação, utilizaram-se os valores máximos da força de reacção. A dispersão dos valores da força de reacção para as diferentes malhas aplicadas pode observar-se no gráfico da Figura 10.3.

Para comparação dos resultados obtidos determinou-se a diferença relativa (δ) dos valores de força máxima obtidos para as diferentes malhas, de acordo com a expressão

$$\delta = \left| \frac{F_n^{\text{máx}} - F_{n+1}^{\text{máx}}}{F_n^{\text{máx}}} \right| \times 100 \quad (10.1)$$

Na expressão anterior, $F_{\text{máx}}$ é o valor máximo de força de reacção da estrutura e os resultados obtidos são indicados na Tabela 10.3.

O gráfico da Figura 10.3 revela, para a malha mais grosseira ($l = 3$ mm), um afastamento do valor de força de reacção da estrutura relativamente aos valores dos restantes estudos, que se apresentam mais próximos entre si. Pode observar-se, através da análise da Figura 10.4, que os valores de força de reacção máxima convergem razoavelmente para todas as dimensões dos elementos finitos considerados. A observação do gráfico da Figura 10.3 revela ainda que as malhas mais refinadas ($l = 0,75$ mm e $l = 0,5$ mm) apresentam problemas de estabilidade numérica e grande oscilação nos resultados. É também de referir que as malhas mais grosseiras ($l = 3$ mm e $l = 2,5$ mm) apresentam problemas no acompanhamento dos elementos do

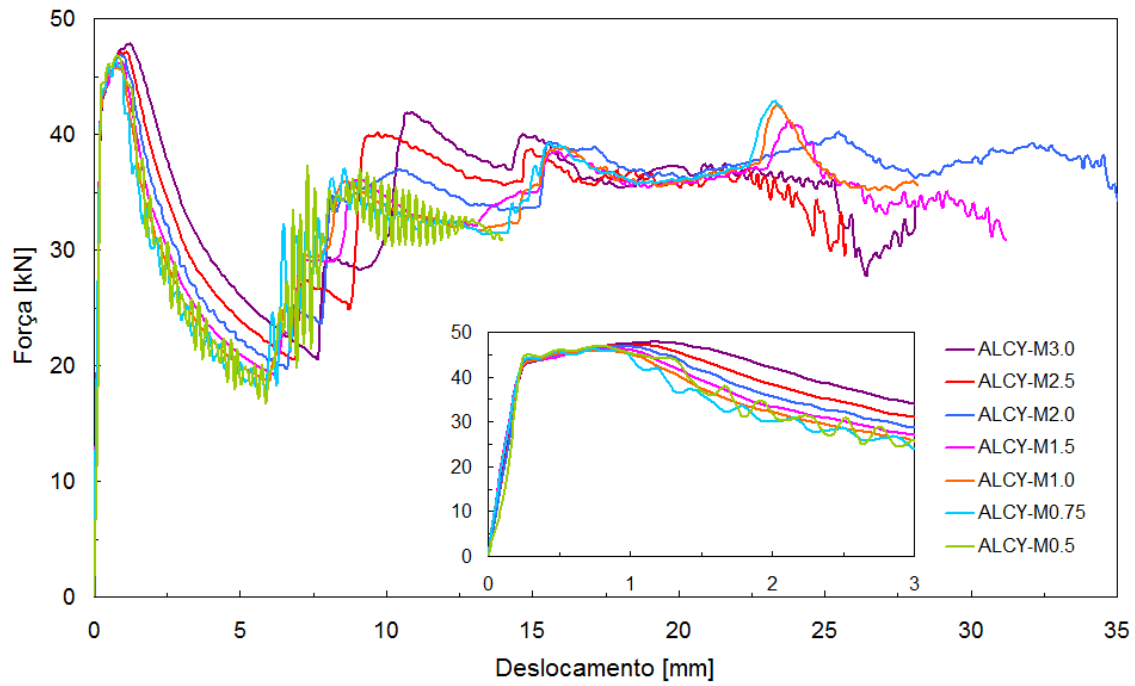


Figura 10.3: Variação da força de reacção da estrutura na placa móvel com o deslocamento. Estudo de optimização da malha de elementos finitos.

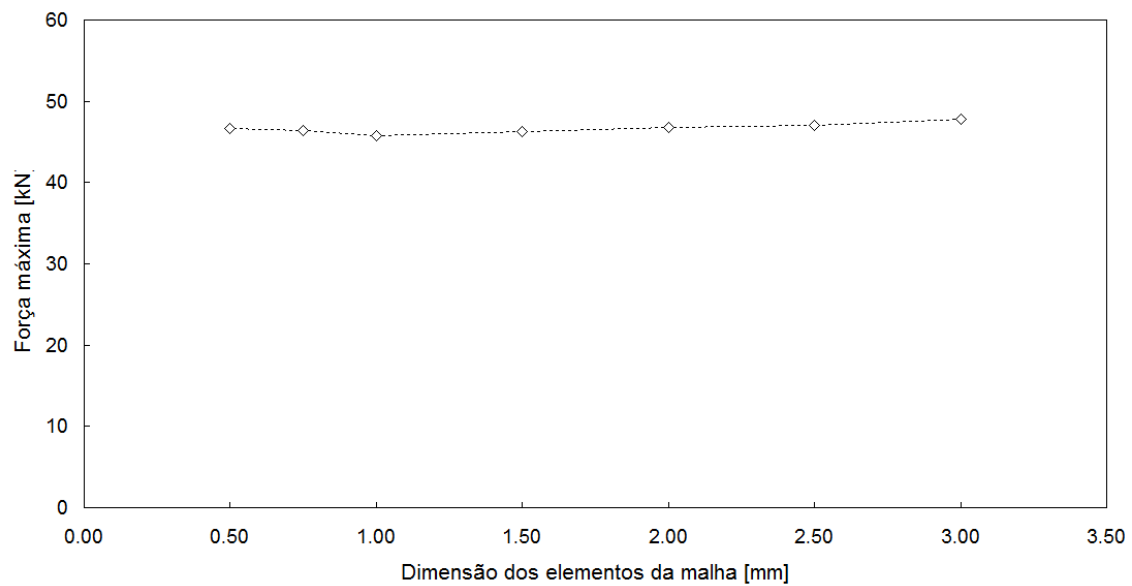


Figura 10.4: Dispersão dos valores de força máxima de reacção na placa móvel com a dimensão do elemento da malha.

Core-Y nas dobras do tubo de Alumínio. Consequentemente, a malha eleita para realizar os restantes ensaios numéricos é a de $l = 2$ mm, já que mostrou ser a que melhor aproximação fornece ($\delta < 1\%$), com menor custo computacional. As malhas testadas estão representadas na Figura 10.5.

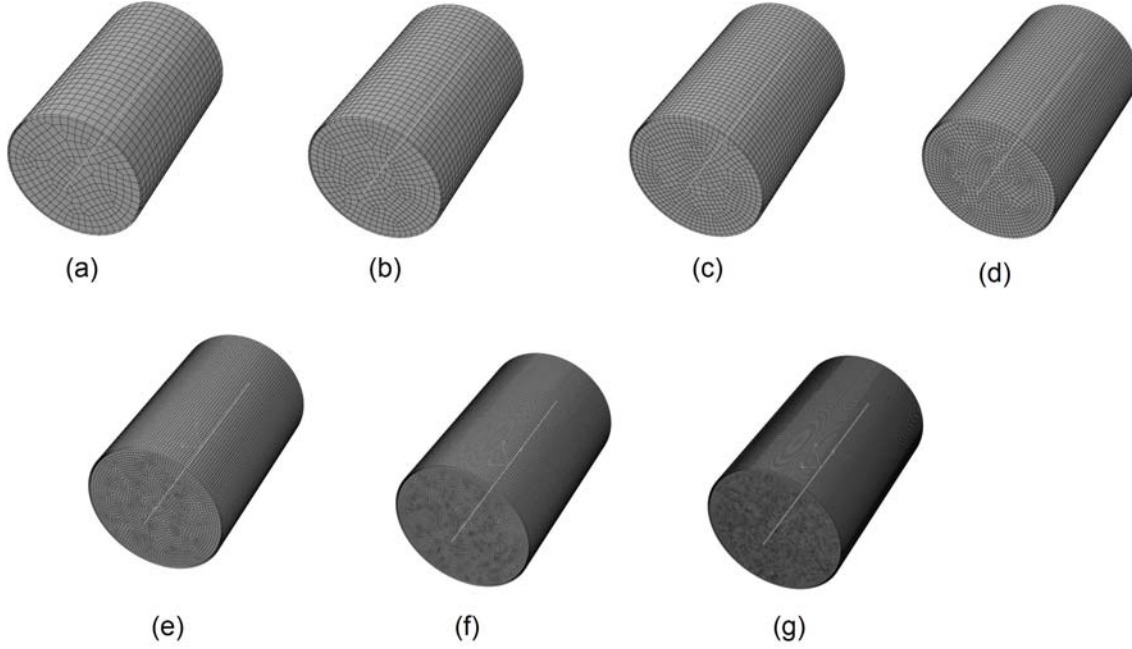


Figura 10.5: Ilustração das malhas testadas durante a fase de optimização da malha de elementos finitos. Malhas de elementos finitos com: (a) $l = 3$ mm, (b) $l = 2,5$ mm, (c) $l = 2$ mm, (d) $l = 1,5$ mm, (e) $l = 1$ mm, (f) $l = 0,75$ mm e (g) $l = 0,5$ mm.

Tabela 10.3: Valores máximos de força de reacção e diferenças relativas no processo de optimização da malha.

Referência	l [mm]	$F_{\text{máx}}$	d
ALCY-M3.0	3,00	47833,60	-
ALCY-M2.5	2,50	47084,40	1,59
ALCY-M2.0	2,00	46812,40	0,58
ALCY-M1.5	1,5	46208,40	1,31
ALCY-M1.0	1,00	45770,80	0,96
ALCY-M0.75	0,75	46344,80	1,24
ALCY-M0.5	0,50	46686,80	0,73

10.3.1 Validação numérica do modelo do tubo de Alumínio

Antes de se partir directamente para o estudo das estruturas de Alumínio preenchidas com o material compósito em estudo, realizou-se uma análise de validação do modelo do tubo de alumínio com o objectivo de detectar falhas potenciais da implementação do modelo assim

como de avaliar os resultados numéricos obtidos e compará-los com resultados experimentais anteriormente realizados.

Com estes procedimentos, pretendeu-se abranger solicitações de compressão uniaxial e determinar se o modelo escolhido permitia ou não realizar com confiança um estudo numérico de estruturas tubulares sujeitas ao mesmo tipo de carregamento e geometrias relativamente às ensaiadas experimentalmente. Os dados dos materiais resultantes de ensaios experimentais de validação foram apresentados na primeira parte deste trabalho.

A validação do modelo de compressão axial em regime *quasi*-estático do tubo de Alumínio teve como comparação o trabalho experimental realizado pela investigadora M. Paulino. Neste sentido, realizaram-se ensaios experimentais com a configuração e dimensões indicadas no Capítulo de Caracterização Experimental. O modelo de material, o tipo de elemento bem como os contactos e condições fronteira utilizados foram os indicados nas secções anteriores. Realizaram-se ensaios a três velocidades diferentes (2, 20 e 200 mm/min). Utilizaram-se elementos de dimensão característica $l = 1$ mm.

Uma vez introduzidos os dados, realizaram-se ensaios numéricos com a definição de condições de carregamento mais aproximadas dos ensaios experimentais.

Os dados relativos às propriedades e comportamento mecânico da liga de Alumínio 6060-T5 utilizado no âmbito deste trabalho foram recolhidos de um catálogo da empresa BÖHLER UDDENHOLM, especializada em materiais metálicos de alto desempenho. Salienta-se, no entanto, que o material foi fornecido pela empresa Extrusal, sediada em Aveiro.

A liga de alumínio 6060-T5 apresenta muito boa capacidade de soldagem e resistência à corrosão. É uma liga muito utilizada na produção de perfis com secções transversais complexas, com aplicação em secções para janelas, portas, calhas, iluminação, escadas, mobiliário e equipamento de escritório.

As propriedades físicas e mecânicas deste material estão descritas na Tabela 10.5. Na Tabela 10.4 apresenta-se a composição química média desta liga de Alumínio. A curva de comportamento da liga de Alumínio utilizada no estudo numérico é representada na Figura 10.6 foi obtida por aplicação da Lei de *Ludwick* 10.2 a partir das propriedades mecânicas da mesma.

A lei de *Ludwick* aplica-se a materiais que apresentam comportamento rígido plástico, sendo uma lei de potência modificada adequada para descrever o comportamento de materiais que apresentam encruamento isotrópico sem saturação até à rotura e encruamento cinemático desprezável [63].

$$\sigma_{\text{Ludwick}} = K (\varepsilon)^n \quad (10.2)$$

Em que $(\varepsilon)^n$ é a deformação plástica do material ($\bar{\varepsilon}^p$), K é uma tensão de valor constante e n um expoente directamente dependente do encruamento do material com valores que oscilam entre zero e 0,5 [63]. Para o caso do trabalho desenvolvido, estes parâmetros são determinados (Equações 10.3 e 10.4) a partir das propriedades físicas e mecânicas recolhidas do catálogo fornecido e apresentadas na Tabela 10.5.

Aplicando a equação 10.2 a dois pontos da curva de comportamento do Alumínio cujas propriedades são conhecidas, os parâmetros K e n são deduzidos da seguinte maneira:

$$\begin{cases} \sigma_0 = K (\varepsilon_0)^n & \text{para ponto de cedência } (\varepsilon_0, \sigma_0) \\ \sigma_u = K (\varepsilon_u)^n & \text{para ponto de ruptura } (\varepsilon_u, \sigma_u) \end{cases}$$

Dividindo as equações resultantes da aplicação da lei de *Ludwick* nos pontos de cedência e de ruptura, resulta:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_u} = \frac{\varepsilon_o^n}{\varepsilon_u^n} = \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_u} \right)^n$$

Aplicando a regra $u = b^n \Leftrightarrow n = \log_b^u$,

$$n = \log_{\frac{\varepsilon_{0,2\%}}{\varepsilon_{rot}}} \left(\frac{\sigma_{0,2\%}}{\sigma_{rot}} \right) \quad (10.3)$$

Conhecendo n , K pode ser determinado directamente da aplicação da equação 10.2 ao ponto de cedência, $K = \frac{\sigma}{(m+\varepsilon)^n}$, resultando:

$$K = \frac{\sigma_{0,2\%}}{(\varepsilon_{0,2\%})^n} \quad (10.4)$$

Realizando,

$$\begin{cases} n = \log_{\frac{0,002}{0,13}} \left(\frac{185}{220} \right) = 0,04 \\ K = \frac{185}{0,002^{0,04}} = 239,44 \end{cases} \Rightarrow \sigma_{\text{Ludwick}}(\varepsilon^p) = 239,44 (m + \varepsilon^p)^{0,04}$$

Tabela 10.4: Composição química da liga de alumínio 6060-T5, utilizada nos tubos testados numérica e experimentalmente.

	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Cu	Al
Val. Médios (%)	0.45	0.1	0.2	0.45	0.15	0.05	0.1	0.1	98

Tabela 10.5: Propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio 6060-T5, utilizada nos tubos testados numérica e experimentalmente.

Densidade	[kg/m ³]	2700
Tensão de ruptura, σ_{rot}	[MPa]	220
Tensão limite de elasticidade, $\sigma_{0,2\%}$	[Mpa]	185
Enlogação na cedência	[%]	13
Enlogação na rotura	[%]	13
Módulo de elasticidade	[GPa]	69,5
Coefficiente de Poisson	[]	0.33

Os pontos introduzidos no programa de simulação numérica foram retirados directamente do gráfico da Figura 10.6.

10.3.2 Resultados e discussão da validação numérica do tubo de Alumínio

Os gráficos das Figura 10.7 a 10.10 mostram os resultados numéricos obtidos para o estudo de validação do modelo do tubo de Alumínio, comparando-os com os resultados dos ensaios experimentais já referidos.

A Figura 10.11 apresenta a geometria deformada dos tubos simulados para as diferentes velocidade de ensaio.

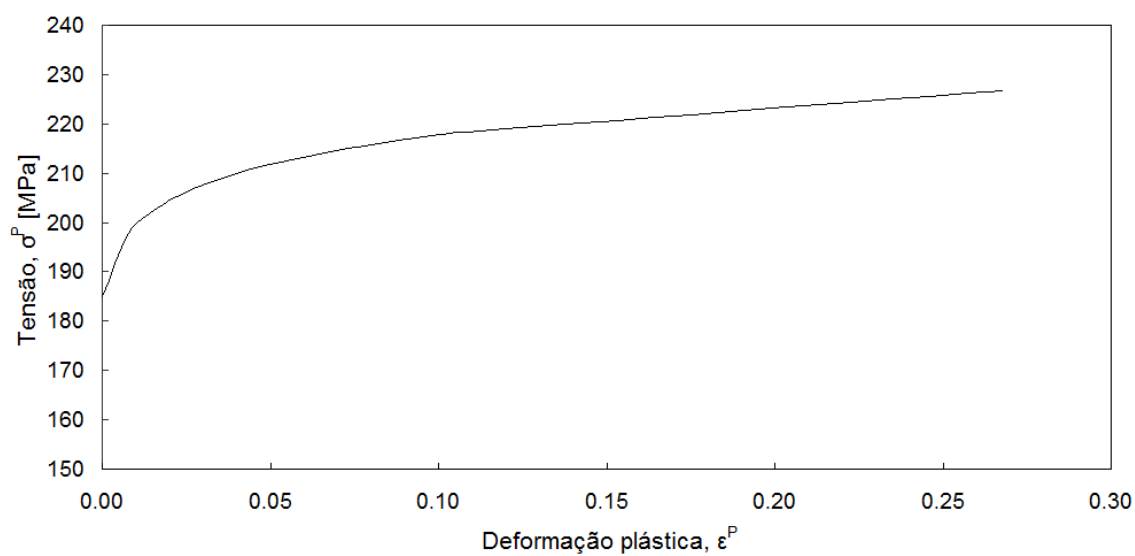


Figura 10.6: Curva de comportamento plástico do Alumínio 6060-T5 utilizada na caracterização do material.

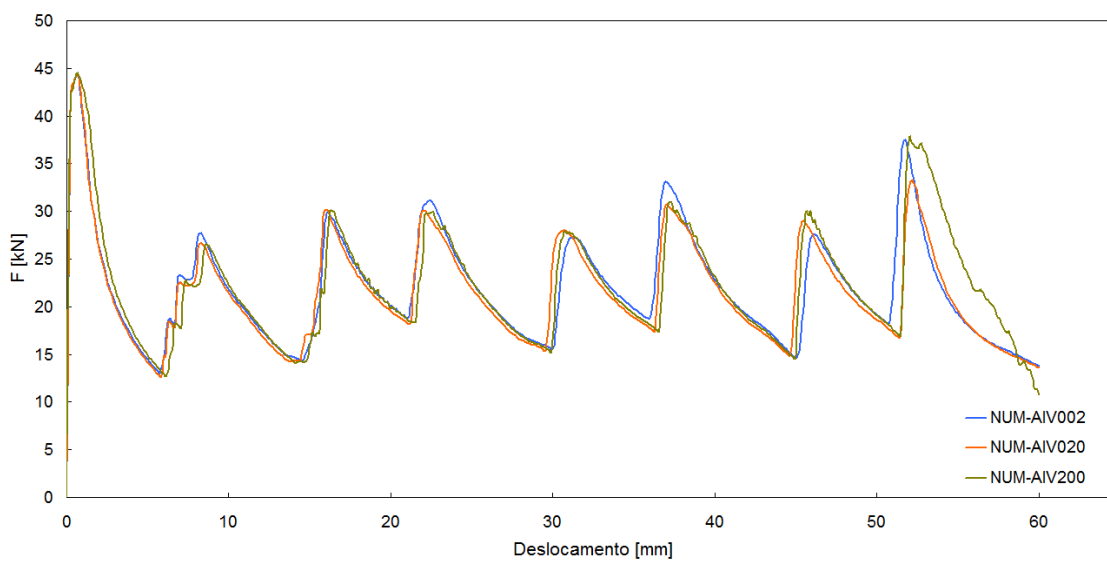


Figura 10.7: Resultados numéricos obtidos para o estudo de validação do modelo do tubo de Alumínio para as diferentes velocidades de ensaio.

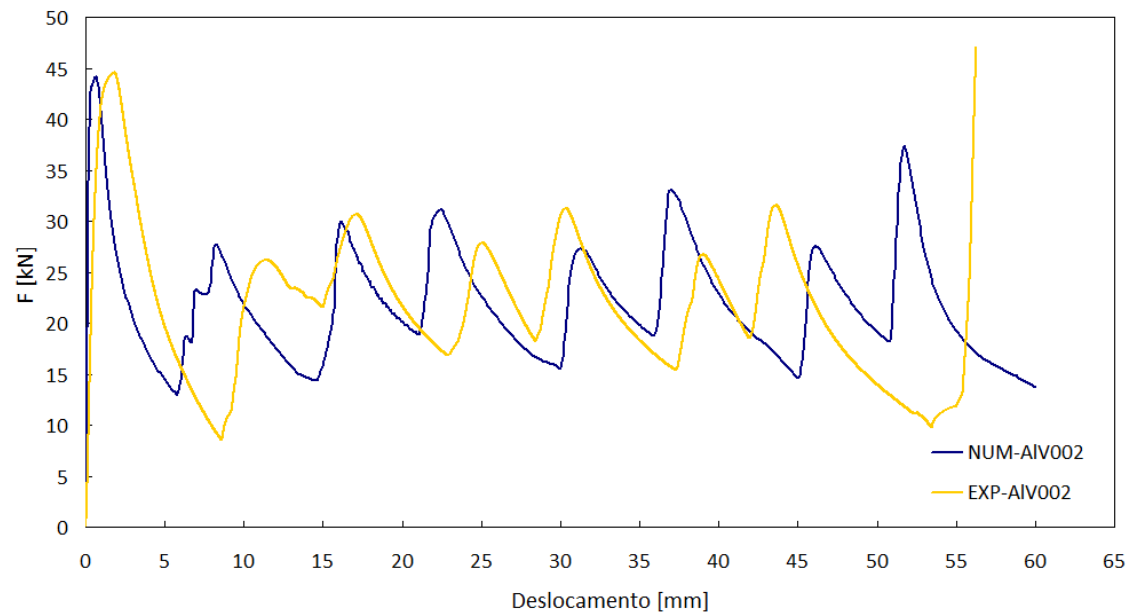


Figura 10.8: Análise comparativa dos resultados numéricos obtidos para o estudo de validação do modelo do tubo de Alumínio com os ensaios experimentais, $v=2$ mm/min.

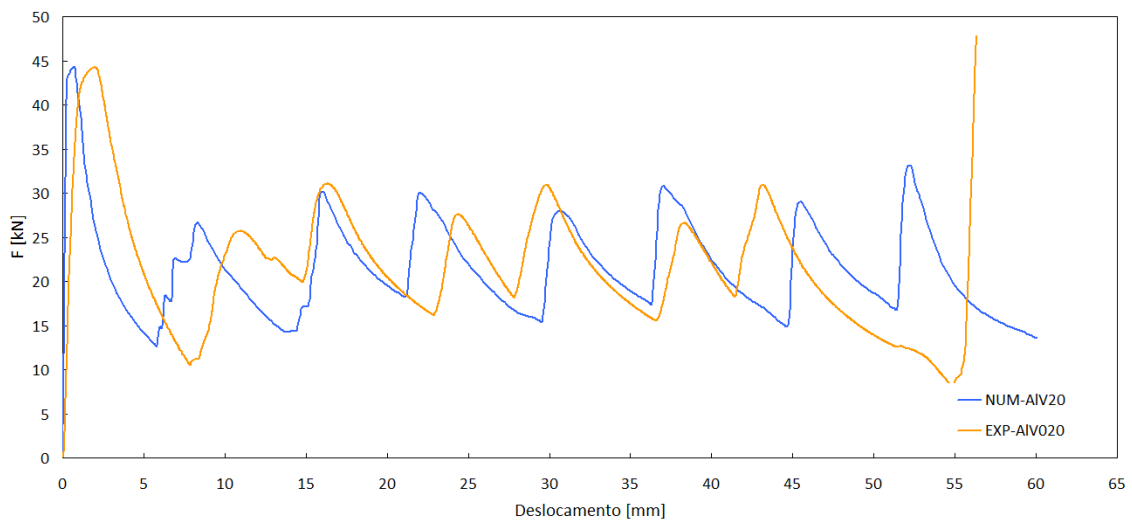


Figura 10.9: Análise comparativa dos resultados numéricos obtidos para o estudo de validação do modelo do tubo de Alumínio com os ensaios experimentais, $v=20$ mm/min.

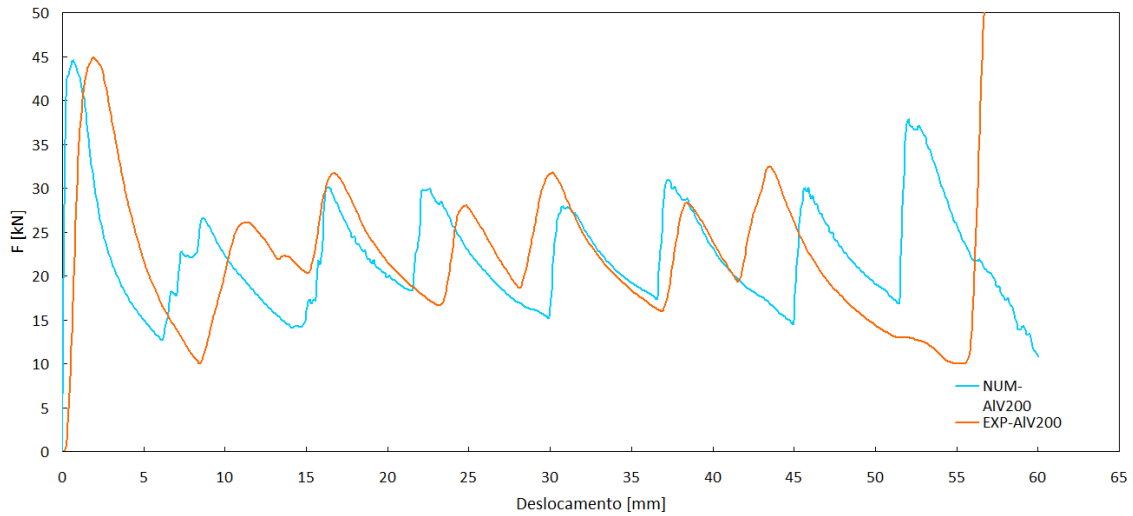
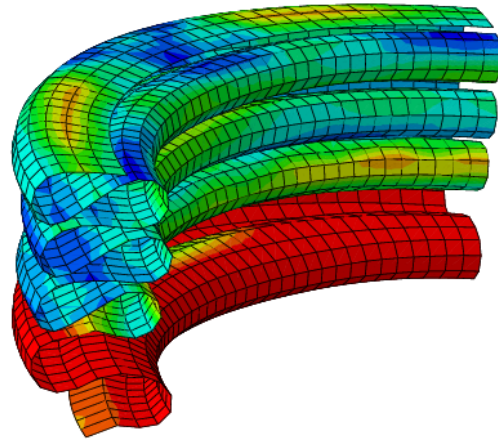


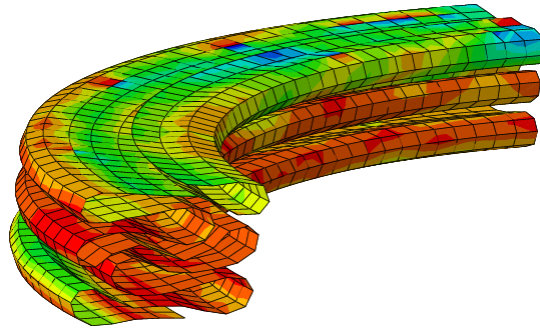
Figura 10.10: Análise comparativa dos resultados numéricos obtidos para o estudo de validação do modelo do tubo de Alumínio com os ensaios experimentais, $v=200$ mm/min.

De acordo com observações numéricas realizadas ao longo do ensaio, a primeira dobra surge sempre na base da estrutura e no sentido exterior do tubo, apresentando uma forma axissimétrica. Com o aumento da deformação do tubo, as dobras seguintes vão-se formando sobre a primeira e com a mesma forma.

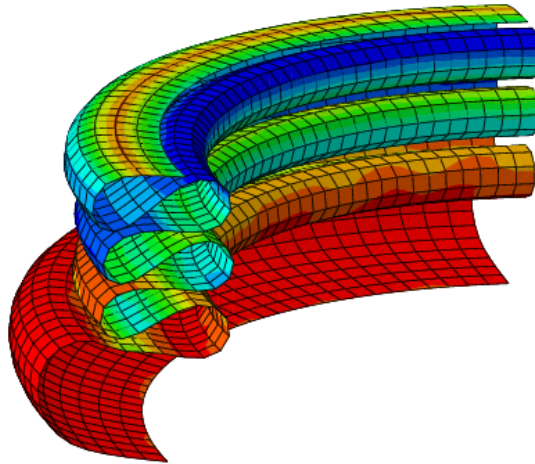
Os resultados numéricos mostram boa concordância com os experimentais. Verifica-se a formação de quatro dobras aquando do mesmo deslocamento e com o mesmo pico de força que o experimental.



(a)



(b)



(c)

Figura 10.11: Geometria das estruturas tubulares deformadas resultante do estudo de validação numérica do modelo do tubo de Alumínio. (a) $v = 2$ mm/min, (b) $v = 20$ mm/min e (c) $v = 200$ mm/min.

Capítulo 11

Resultados e discussão

No gráfico da Figura 11.1 apresentam-se os resultados numéricos do efeito de confinamento do Core-Y em estruturas tubulares de Alumínio.

Ainda que as condições de ensaio permitissem que a estrutura atingisse mais de 80% de deformação, tal não foi verificado. Na verdade, o efeito da pressão hidrostática do Core-Y sobre o interior da estrutura de Alumínio não permite que tal se verifique. Por outro lado, registaram-se problemas relacionados com os elementos finitos e com a convergência de malha.

Na Figura 11.2 é visível a gama de tensões registada no tubo de Alumínio quando preenchido com Core-Y, para a máxima deformação alcançada e velocidade de ensaio estudada.

Poderia propor-se um estudo do efeito do refinamento da malha do compósito nas zonas sujeitas a maiores deformações e, deste modo, tentar contornar os problemas relacionados com os elementos finitos e com a convergência de malha.

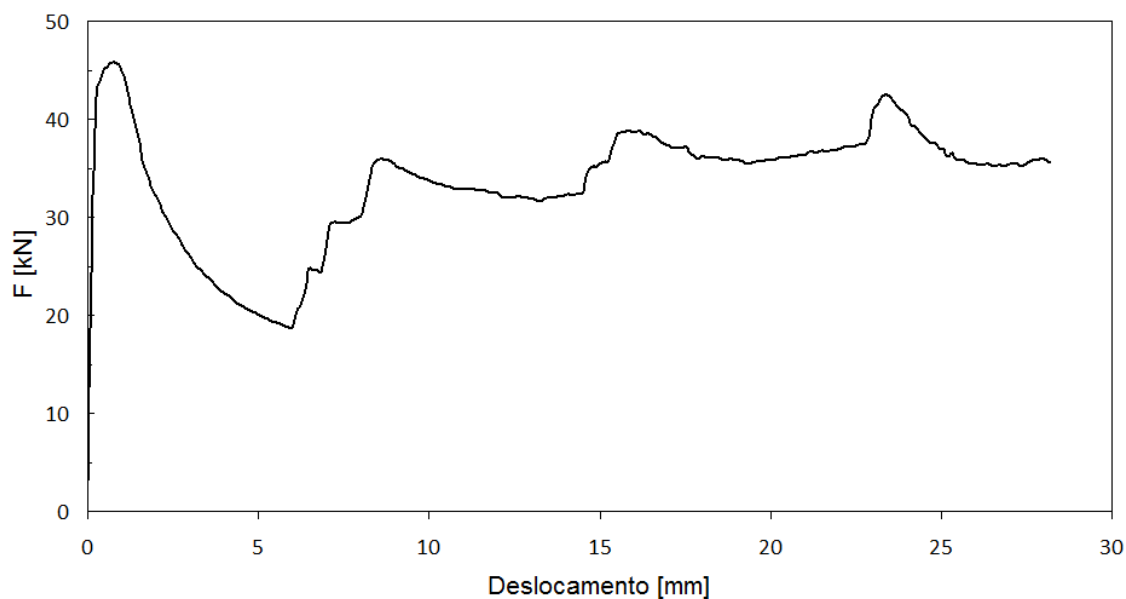


Figura 11.1: Resultados numéricos do efeito de confinamento do Core-Y em estruturas tubulares de Alumínio.

O gráfico da Figura 11.3 apresenta um estudo comparativo dos resultados numéricos do

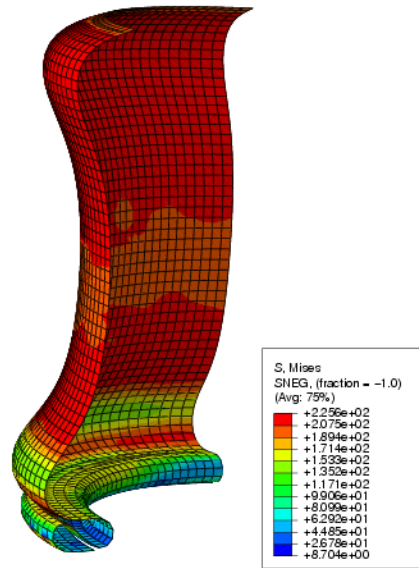


Figura 11.2: Gama de tensões registada no tubo de Alumínio quando preenchido com Core-Y, para a máxima deformação alcançada e velocidade de ensaio estudada.

estudo do efeito de confinamento do Core-Y em estruturas tubulares de Alumínio com os resultados experimentais do trabalho de investigação levado a cabo pela investigadora M. Paulino.

Do gráfico da Figura 11.3 é visível que os resultados obtidos para o estudo do confinamento do Core-Y em estruturas tubulares de Alumínio em condições idênticas aos ensaios experimentais, se apresentam dentro da mesma gama de valores, para as condições de ensaio testadas.

Por fim, e com o objectivo de estudar o efeito de interacção dos materiais nas estruturas ensaiados numericamente, apresenta-se, no gráfico da Figura 11.4, os resultados numéricos obtidos de quatro formas: apenas com Alumínio, apenas com Core-Y, com a soma dos dois anteriores, e com Core-Y confinado no tubo de Alumínio.

É visível uma diferença significativa entre a soma dos resultados numéricos dos ensaios individuais do Alumínio e do Core-Y e os resultados numéricos do Core-Y confinado ao Alumínio. Essa diferença resulta do efeito da interacção dos constituintes das estruturas tubulares ensaiadas.

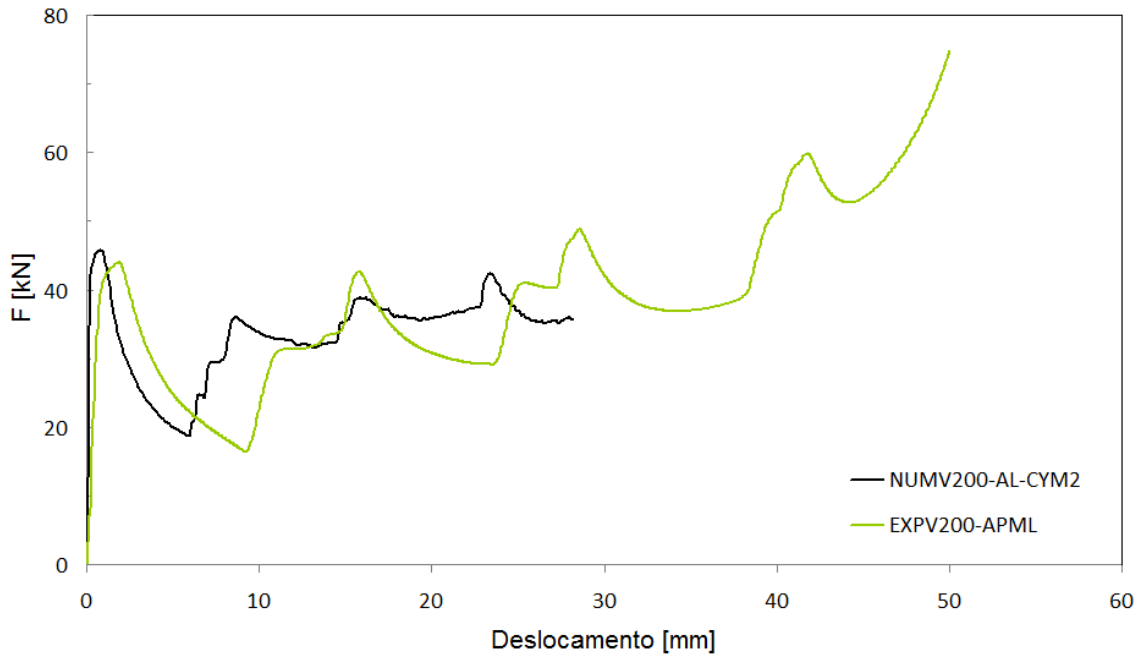


Figura 11.3: Resultados comparativos entre o estudo numérico do efeito de confinamento do Core-Y e os resultados experimentais de estruturas tubulares de Alumínio preenchidas com esferas de Alumínio.

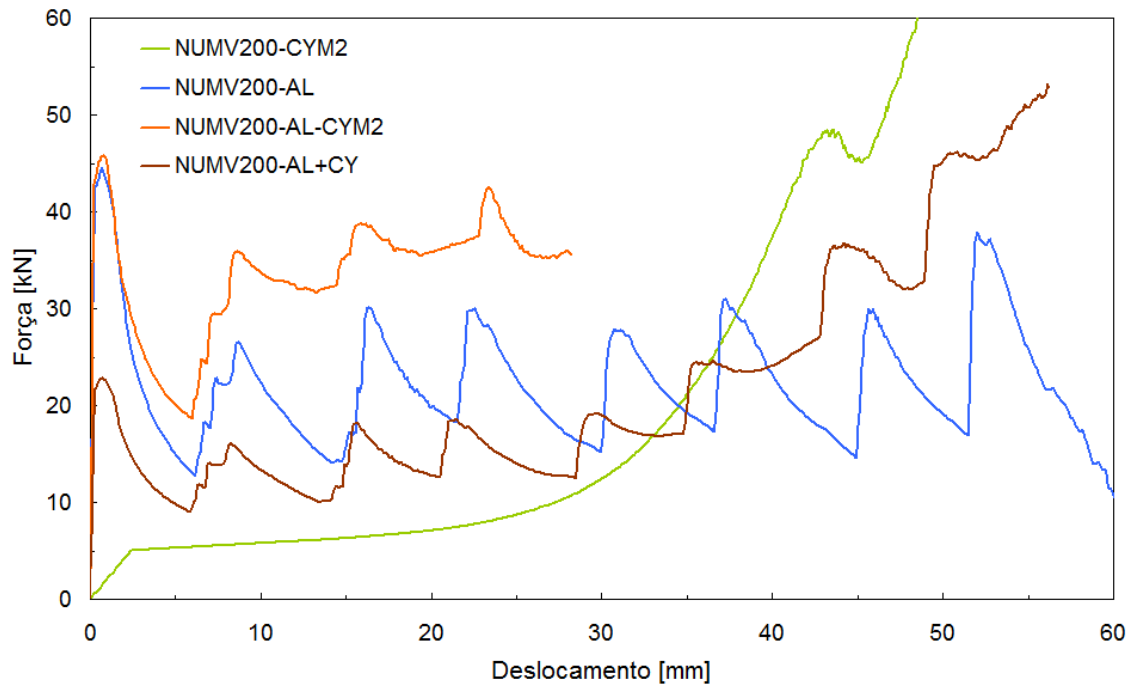


Figura 11.4: Resultados numéricos de estruturas tubulares de Alumínio com e sem preenchimento de Core-Y e estruturas tubulares de Core-Y sem estarem confinadas. Estudo do efeito de interação.

Parte IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Capítulo 12

Considerações finais

No âmbito deste trabalho, o principal objectivo de desenvolver um material como o Core-Y foi apresentar o seu processo de fabrico, enquanto aplicação inovadora para a cortiça. Para além disso, é sem dúvida desejável pensar e definir um conjunto de possíveis aplicações para esse material, estudando a sua viabilidade e o seu desempenho.

Como foi referido, o Core-Y resulta da incorporação de um material celular de comportamento viscoelástico — a cortiça — num material polimérico — a resina epóxida. A sua classificação como material compósito de reforço celular leva a pensar, em primeiro lugar, no que têm em comum os materiais celulares (em particular os naturais): a capacidade de suportar esforços de compressão. Por outro lado, é inevitável também pensar em características como a grande capacidade de absorção de energia de impacto. Deste modo, o Core-Y poderá ter relevância e aplicabilidade quando inserido em elementos estruturais sujeitos a impacto, em especial na indústria automóvel.

O trabalho exposto nesta dissertação compreende uma forte componente experimental, que se centra na compreensão e utilização de dois ensaios distintos: o de compressão axial *quasi*-estática e o de vibração livre. A componente numérica do trabalho aqui apresentado baseou-se na utilização do programa simulação pelo método dos elementos finitos Abaqus/Explicit, tendo sido implementado um modelo numérico válido para caracterizar o Core-Y em solicitação axial de compressão *quasi*-estática. Neste âmbito, foi também estudado o efeito do confinamento do material em estruturas tubulares metálicas. Através desta abordagem, tanto experimental quanto numérica, exploraram-se diversas áreas de estudo e foi possível extrair as conclusões a seguir resumidas.

Inicialmente, procedeu-se à apresentação do contexto em que se insere o trabalho, realçando-se as principais linhas de estudo. Seguidamente, foi desenvolvido um processo de fabrico optimizado para o Core-Y, que apresentou inúmeras dificuldades. As soluções finais adoptadas mostraram-se funcionais e poderão estar próximas de um processo ideal e optimizado de fabrico. No entanto, a implementação de aplicações reais para o Core-Y carecem ainda de estudo mais aprofundado.

Efectuaram-se também ensaios de compressão uniaxial *quasi*-estáticos e de vibração livre em provetes de Core-Y, observaram-se os mecanismos de deformação dos provetes à escala macroscópica e determinaram-se as propriedades mecânicas essenciais. Foram identificadas falhas relacionadas com os métodos utilizados para determinação das propriedades do material e realçados os pontos que fazem do Core-Y um material de comportamento relativamente complexo e sujeito a grande variabilidade, quer estrutural quer de propriedades mecânicas.

Os ensaios experimentais forneceram os valores de entrada e conceitos de base necessários à implementação de parâmetros de modelação adequados ao tipo de materiais e aplicações em causa.

Foram ainda apresentados e testados diferentes modelos constitutivos para aproximar o comportamento à compressão do Core-Y. Pretendeu-se assim compreender melhor a natureza do material em estudo com base em modelos analíticos simples.

Por último, implementou-se e validou-se um modelo numérico dedicado à simulação de estruturas tubulares metálicas com confinamento de Core-Y comprimidas uniaxialmente. Analisaram-se e justificaram-se todos os parâmetros utilizados na modelação numérica, nomeadamente, a geometria das estruturas, o tipo de elementos finitos, a discretização, os modelos de material, as condições de fronteira e os tipos de contactos. A validação foi levada a cabo com base nos ensaios experimentais.

Globalmente, todos os estudos numéricos permitiram concluir que o Core-Y é um material capaz de aumentar a capacidade de absorção de energia das estruturas tubulares metálicas no interior das quais é confinado.

A simulação numérica e o modelo implementado neste trabalho são ferramentas de grande potencial que podem vir a ser utilizadas para o estudo de outras estruturas, com geometrias e funcionalidades distintas, incorporando o material desenvolvido. Assim, o presente trabalho proporciona a possibilidade de realização de estudos futuros de natureza muito variada, envolvendo componentes estruturais sob solicitações dinâmicas e *quasi*-estáticas de Core-Y. Entre muitos outros, destacam-se os seguintes:

- Utilização de confinamentos mistos em aplicações de protecção contra choque;
- Desenvolvimento de confinamentos parciais de forma a reduzir a massa específica das estruturas, assegurando uma elevada capacidade de absorção de energia.

Bibliografia

- [1] M. E. Rosa e H. Pereira M. A. Fortes. *A Cortiça*. IST Press, 2006.
- [2] M. S. Paulino. Aplicação estrutural de cortiça para melhoria da segurança passiva em caso de impacto. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2008.
- [3] O que é a cortiça?, in *Associação Portuguesa de Cortiça*, 2010. <http://www.realcork.org/artigo.php?art=235>, [consultado em 10-11-2010].
- [4] M. Gouveia. *Cortiça: uma indústria tradicional virada para o futuro*. Diário Económico 18/6/2001, 2001.
- [5] R. Hooke. *Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*. J. Martyn e J. Allestry, first edition, 1665.
- [6] C. P. Gameiro. *Capacidade de absorção de energia de impacto de estruturas tubulares com cortiça confinada - Estudo numérico e experimental*. PhD thesis, PhD thesis, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2007.
- [7] L. J. Gibson, K. E. Easterlinge, and M. F. Ashby. The structure and mechanics of cork. *Proceedings of the Royal Society of London*, A377:99–117, 1981.
- [8] L. J. Gibson e M. F. Ashby. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press, Second edition, 1997.
- [9] M. Emília Rosa and M. A. Fortes. Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *Journal of Materials Science*, 23:878–885, 1998.
- [10] M. E. Rosa and M. A. Fortes. Stress relaxation and creep of cork. *Journal of Materials Science*, 23:35–42, 1988.
- [11] J. F. Mano. The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, 37:257–263, 2002.
- [12] J. F. Mano. Creep-recovery behaviour of cork. *Materials Letters*, 61:2473–2477, 2007.
- [13] M. F. Vaz and M. A. Fortes. Friction properties of cork. *Journal of Materials Science*, 33:2087–2093, 1998.
- [14] J. N. Marat-Mendes and E. R. Neagu. The study of electrical conductivity of cork. *Ferroelectrics*, 294:123–131, 2003.

- [15] H. Pereira, M. E. Rosa, and M. A. Fortes. The cellular structure of cork from *quercus suber*. *IAWA Bulletin*, 8:213–218, 1987.
- [16] P. Pina and M. A. Fortes. Characterization of cells in cork. *Journal of Physics*, D29:2507–2514, 1996.
- [17] H. Pereira, J. Graça, and C. Baptista. The effect of growth-rate on the structure and compressive properties of cork. *IAWA Bulletin*, 13:389–396, 1992.
- [18] M. A. Fortes and M. E. Rosa. Growth stresses and strains in cork. *Wood Science and Technology*, 26:241–258, 1992.
- [19] M. A. Fortes and M. E. Rosa. Compressão cíclica de cortiça. *Actas dos Materiais*, 87:321–334, 1987.
- [20] M. E. Rosa and M. A. Fortes. Deformation and fracture of cork in tension. *Journal of Materials Science*, 26:341–348, 1991.
- [21] M. E. Rosa and M. A. Fortes. Water absorption by cork. *Wood and Fiber Science*, 25:339–348, 1993.
- [22] A. M. Gil, M. H. Lopes, C. P. Neto, and P. T. Callaghan. An nmr microscopy study of water absorption in cork. *Journal of Materials Science*, 35:1981–1990, 2000.
- [23] M. A. Fortes and M. T. Nogueira. The poisson effect in cork. *Materials Science and Engineering*, A122:227–232, 1989.
- [24] L. Gil. Effect of hot pressing densification on the cellular structure of black agglomerated cork board. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 52:131–134, April, 1994.
- [25] L. Gil. Densification of black agglomerate cork boards and study of densified agglomerates. *Wood Science and Technology*, 30:217–223, 1996.
- [26] M. J. Teixeira, A. C. Fernandes, B. Saramago, M. E. Rosa, and J. C. Bordado. Influence of the wetting properties of polymeric adhesives on the mechanical behaviour of cork agglomerates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 10:1111–1127, 1996.
- [27] V. Gómez-Serrano, P. de la Rosa-Blanco, M. A. Diaz-Diez, A. Diaz-Parralejo, and A. Macias-Garcia. A study on the density of agglomerates prepared from cork wastes. *Journal of Materials Science and Technology*, 19:46–50, 2003.
- [28] P. J. R. O. Nóvoa, M. C. S. Ribeiro, A. J. M. Ferreira, and A. T. Marques Marques. Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates. *Composites Science and Technology*, 64(13-14):2197–2205, October 2004.
- [29] A. Costa, H. Pereira, and A. Oliveira. Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production. *Forest Ecology and Management*, 175:239–246, March, 2003.
- [30] A. Costa, M. Madeira, and A. C. Oliveira. The relationship between cork oak growth patterns and soil, slope and drainage in a cork oak woodland in southern Portugal. *Forest Ecology and Management*, 255:1525–1535, 2008.

- [31] M. E. Rosa e H. Pereira M. A. Fortes. *A Coriça*. IST Press, Lisboa, 2004.
- [32] H. Pereira. *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier Science, 2007.
- [33] Celina Pires Gameiro, José Crine, and Gérard Gary. Experimental study of the quasi-static and dynamic behaviour of cork under compressive loading. *Journal of Materials Science*, 42:4316–4324, 2007.
- [34] C.P. Gameiro and J. Cirne. Dynamic axial crushing of short to long circular aluminium tubes with agglomerate cork filler. *Journal of Mechanical Sciences*, 49(9):1029–1037, September September, 2007.
- [35] C. P. Gameiro, J. Cirne, V. Miranda, J. Pinho da Cruz, and F. Teixeira-Dias. Dynamic behaviour of cork and cork-filled aluminium tubes: Numerical simulation and innovative applications. *Holzforschung*, 61:400–405, 2007.
- [36] O. Castro, J. M. Silva, and T. Devezas. Caracterização de estruturas tipo sandwich com aglomerados de cortiça para aplicação aeroespacial. In *Conferência Engenharias Inovação&Desenvolvimento*, Covilhã, 2007.
- [37] D. Zenkert. *The Handbook of Sandwich Construction*. EMAS Publishing, 1997.
- [38] M. C. Lança, E. R. Neagu, Silva P., L. Gil, and J. Marat-Mendes. Study of electrical properties of natural cork and two derivative products. *Materials Science Forum*, 514-516:940–944, 2006.
- [39] M. C. Lança, E. R. Neagu, P. Silva, L. Gil, and J. Marat-Mendes. Can a cork/tetrapak/wax composite be used as a smart sensor? In *European Congress on Advanced Materials and Processes 2007*, Nuremberg, 2007.
- [40] Gil L. and Cortiço P. Aproveitamento de resíduos de embalagens do tipo tetrapak® e de cortiça para o fabrico de aglomerados. *Indústria e Ambiente*, 32:24–27, 2003.
- [41] L. Gil and P. Silva. Novos materiais ou processos relacionados com materiais, patenteados, com base em cortiça. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, 16:12–15, 2004.
- [42] L. Gil, C. Pereira, and P. Silva. New cork products patented by ineti. In *Suberwood 2005 Conference*, Huelva, 2005.
- [43] L. Gil. Aproveitamentos inovadores de resíduos e subprodutos de transformação da cortiça. *Vida Rural*, 31:1716–1732, 2006.
- [44] L. Gil. New cork powder particleboards with thermoplastic binding agent. *Wood Science and Technology*, 27:173–182, 1993.
- [45] L. Gil. 6th int. conference on composites engineering. In *Cork composites: current applications and new developments*, Orlando, 1999.
- [46] F. B. Abdallah, R. Ben Cheick, M. Baklouti, Z. Denchev, and A. M. Cunha. Characterization of composite materials based on pp-cork blends. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25:1499–1506, 2006.

- [47] M. Aziz, C. Murphy, and S. Ramaswamy. Lightweight concrete using cork granules. *The International Journal of Lightweight Concrete*, 1:29–33, 1979.
- [48] W. Zbigniew, P. Fecko, and M. Kusnierová. *Waste Recycling*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, 2005.
- [49] F. Branco, A. Tadeu, and M. Reis. Can cork be used as a concrete aggregate? *International Journal for Housing Science and its Applications*, 31:1–12, 2007.
- [50] S. Karade, M. Irle, and K. Maher. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. *Springer-Verlag*, 64:281–286, 2006.
- [51] R. Eires, S. Jalali, and A. Camões. Novos compósitos eco-eficientes para aplicações não estruturais na construção. 2007.
- [52] C. Pereira, F. Jorge, M. Irle, and J. Ferreira. Characterizing the setting of cement when mixed with cork, blue gum, or maritime pine, grown in portugal i: temperature properties and compatibility indices. *Journal of Wood Science*, 52:311–317, 2006.
- [53] C. Pereira, F. Jorge, M. Irle, and J. Ferreira. Characterizing the setting of cement when mixed with cork, blue gum, or maritime pine, grown in portugal ii: X-ray diffraction and differential thermal analyzes. *The Japan Wood Research Society*, 2006.
- [54] F. Hernández-Olivares, M. R. Bollati, M. del Rio, and B. Parga-Landa. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13:179–186, 1999.
- [55] R. Silva. Melhoria da resposta sísmica de edifícios com recurso a paredes de corbe. Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2008.
- [56] S. Oprea. Effects of fillers, namely cork, on polyurethane resin based polyurethane elastomeric bearing materials for passive isolation. *Journal of Composites Materials*, 42:2673–2685, 2008.
- [57] Marcelo F. S. F. Moura, Alfredo B. Morais, and A. Magalhães. *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Publindústria, Edições Técnicas, 2005.
- [58] William F. Smith. *Princípios de ciência e engenharia de materiais*. McGraw-Hill, 1998.
- [59] Product list, in *Sika-Tooling and Composites* [em linha], 2010. <http://www.sika-tooling.com/tooling/tooling-tds/tooling-tds-alpha.htm>, [consultado em 1-05-2010].
- [60] J. D. Rodrigues. *Apontamentos da disciplina de Vibrações Mecânicas*. Vibração de flexão de vigas, 2003.
- [61] F. Teixeira-Dias, J. Pinho da Cruz, R. A. Valente Fontes, and R. J. Alves Sousa. *Método dos Elementos Finitos*. ETEP, 2010.
- [62] A. G. Hanssen, O. S. Hopperstad, M. Langseth, and H. Ilstad. Validation of constitutive models applicable to aluminium foams. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(2):359–406, February 2002.
- [63] J. Chakrabarty. *Applied Plasticity*. Springer, 2000.